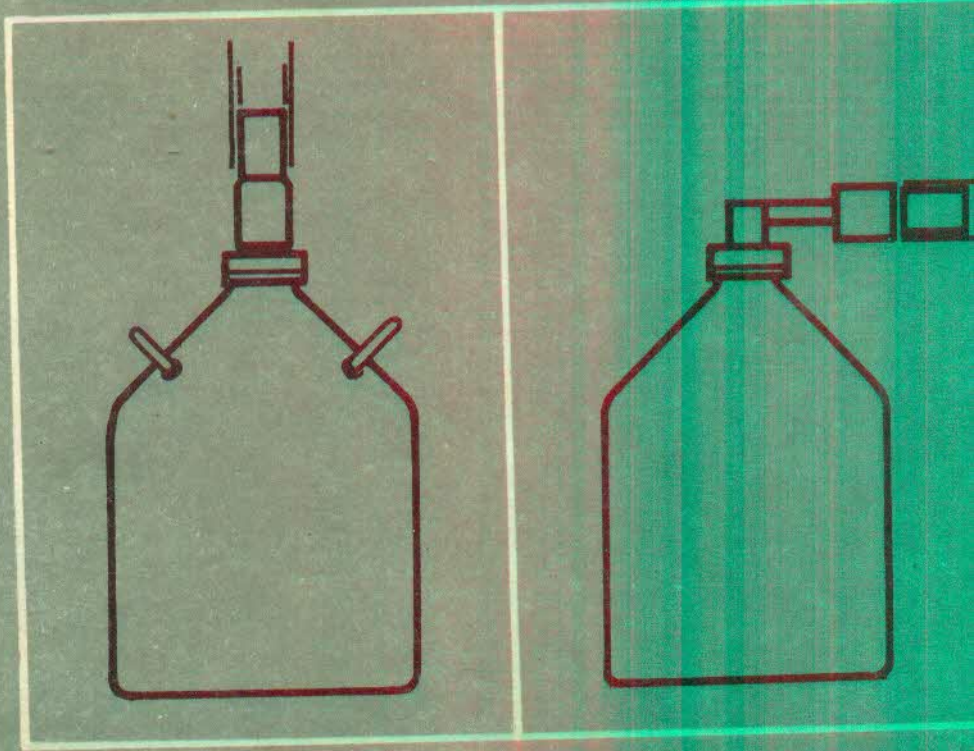
বিকিরণ সন্ধান এবং পরিমাপন



আবদুল জলিল

চিকিৎসাশাস্ত্রে রোগ নিরূপণ তথা নিরাময়ে, কৃষিক্ষেত্রে নানাবিধ উচ্চ ফলনশীল বীজ উদ্ভাবনে, রোগনিরোধী চারা উৎপাদনে ও শস্য সংরক্ষণে, শিল্পক্ষেত্রে উৎপাদনে গুণগত মান নিয়ন্ত্রণ ও নিশ্চয়তাবিধান এবং গবেষণা ও উন্নয়নে তেজস্ক্রিয় বিকিরণের অবদান অপরিমেয়। কিন্তু এর অপপ্রয়োগ বা অতি বিকিরণপাত স্বাস্থ্য ঝুঁকির কারণ হয়ে দাঁড়াতে পারে। ঝুঁকি এড়ানোর জন্য দরকার বিকিরণের যথাযথ সন্ধান ও পরিমাপন। এ পুস্তকে তাই বিকিরণ সন্ধান ও পরিমাপনে নিয়োজিত বিভিন্ন সন্ধান পদ্ধতি ও সন্ধানী নিয়ে সবিস্তারে আলোচনা করা হয়েছে। স্নাতক ও স্নাতকোত্তর পর্যায়ের উপযোগী করে সাজানো হয়েছে আলোচ্য বিষয়সমূহ।

বিকিরণ সন্ধান এবং পরিমাপন

[দ্বিতীয় খণ্ড]

RADIATION DETECTION AND MEASUREMENT

[Part-II]

Dhaka

ডঃ আবদুল জলিল
প্রধান বৈজ্ঞানিক কর্মকর্তা
বাংলাদেশ পরমাণু শক্তি কমিশন
ঢাকা

বাংলা একাডেমী ঢাকা

প্রথম প্রকাশ
বৈশাখ ১৪০৫/এপ্রিল ১৯৯৮

এ (১৯৯৭-৯৮ পাঠ্যপুস্তক : ভৌ ও প্র : ৮) ৩৭৪৮

মুদ্রণ সংখ্যা ১২৫০

পাণ্ডুলিপি প্রণয়ন ও মুদ্রণ তত্ত্বাবধান
ভৌতবিজ্ঞান ও প্রকৌশল উপবিভাগ
ভৌ ও প্র ১৭৮

প্রকাশক
গোলাম মঈনউদ্দিন
পরিচালক
পাঠ্যপুস্তক বিভাগ
বাংলা একাডেমী, ঢাকা

মুদ্রক
মধুপুর প্রিন্টার্স
১৫/সি, আজিমপুর রোড
ঢাকা-১২০৫

প্রচ্ছদ
হেলাল উদ্দিন আহমেদ

মূল্য : ৮০.০০

BANSDOC Library
Accession No. 17002
Date 10.6.04

BIKIRON SANDHAN EBONG PARIMAPAN (Radiation Detection and Measurement. Part-II) by Dr. Abdul Jalil, Chief Scientific Officer, Bangladesh Atomic Energy Commission, Dhaka. Published by Gholam Moyenuddin, Director, Textbook Division, Bangla Academy, Dhaka, Bangladesh. First edition, April 1998. Price: Taka. 80'00.

ISBN 984-07-3757-0

উৎসর্গ

প্রখ্যাত জীববিজ্ঞানী বন্ধুবর প্রফেসর ডঃ নঈম [illegible]

Dhaka

ভূমিকা

সারা বিশ্বে কৃষি, চিকিৎসা, শিল্প এবং গবেষণা ও উন্নয়নে বিকিরণের বহুল ব্যবহার চালু রয়েছে। বিজ্ঞান ও প্রযুক্তির প্রতিটি ক্ষেত্রে সমস্যা সমাধান ও উন্নয়নে এর নব নব প্রয়োগ প্রতিদিন বেড়ে চলেছে। মানুষের হাতে এ এক অনুপম হাতিয়ার (tools)। হাতিয়ারের বহুবিধ ব্যবহার নির্ভর করে এর সম্যক উপলব্ধির উপর। কোনো বিষয় সম্পর্কে জানার ও বুঝার সর্বোৎকৃষ্ট উপায়—মাতৃভাষায় এর পঠন, চর্চা ও অনুশীলন। এতদুদ্দেশ্যেই বিকিরণ সন্ধান ও পরিমাপন বিষয়ে মাতৃভাষায় গ্রন্থটি রচনায় আমার এ ক্ষুদ্র প্রচেষ্টা। এর মূল লক্ষ্য শিক্ষার্থীদের বিকিরণ যন্ত্রায়ন (instrumentation) ও পরিমাপন বিষয়ে সম্যকভাবে অবহিত করানো।

বিকিরণের বাস্তব সমস্যা সমাধান ও এর প্রয়োগের পূর্বশর্ত হচ্ছে বিকিরণ সম্বন্ধে আগাগোড়া বুঝা, শনাক্ত করা (detect) ও যথাযথভাবে পরিমাপন করা। প্রতিটি বিষয়ে মৌলিক (fundamental) উপাদান থেকে আলোচনা শুরু করা হয়েছে।

গ্রন্থটি দ্বিবিধ উদ্দেশ্য সাধনে সক্ষম হবে আশা করি। প্রথমত, নিউক্লীয় যন্ত্রায়ন (nuclear instrumentation) তথা বিকিরণ পরিমাপনে এটি পাঠ্যপুস্তক হিসেবে বিশ্ববিদ্যালয়সমূহের পাঠ্যক্রম অনুসারে রচিত। এছাড়া বিকিরণ সংক্রান্ত যে কোনো বিষয়ের যেমন: ভৌতবিজ্ঞান, জীববিজ্ঞান এবং প্রকৌশল ও প্রযুক্তি বিষয়ের ছাত্র-ছাত্রীদের সহায়ক গ্রন্থ হিসেবে কাজে লাগবে।

বাংলাভাষায় এ ধরনের কোনো গ্রন্থ রচিত হয়েছে কিনা আমার জানা নেই। এ গ্রন্থ রচনাকালে ইংরেজি, ফরাসি ও জার্মান ভাষায় লেখা অনেক পুস্তক-পুস্তিকার সাহায্য নেয়া হয়েছে।

বইটির মুদ্রণ কাজ ত্বরান্বিত করায় অনবধানতাবশত মুদ্রণ ত্রুটি থাকা স্বাভাবিক। পাঠকগণ এটি ক্ষমা সুন্দর দৃষ্টিতে দেখবেন বলে আশা করি। গ্রন্থটির উন্নয়নে যে কোনো গঠনমূলক সমালোচনা ও পরামর্শ সাদরে গৃহীত হবে।

BANSDOC Library
Accession No. 17902

আবদুল জলিল

BANSDOC Library
Dhaka

সূচিপত্র

পৃষ্ঠা

প্রথম অধ্যায় : **অর্ধপরিবাহী সন্ধানী** ১—৪৭

১.১ ভূমিকা ; ১.২ অর্ধপরিবাহী পদার্থের ধর্মাবলী ; ১.৩ অর্ধপরিবাহী পদার্থে আয়নায়ন বিকিরণের ক্রিয়া ; ১.৪ অর্ধপরিবাহী বিকিরণ সন্ধানী ; ১.৫ অর্ধপরিবাহী সন্ধানীর অবস্থান-অবস্থা ; ১.৬ অর্ধপরিবাহী সন্ধানী চালনা বৈশিষ্ট্য ; ১.৭ পৃষ্ঠবাঁধ ও ব্যাপ্ত জংশন সন্ধানীর প্রয়োগ।

দ্বিতীয় অধ্যায় : **লিথিয়াম তাড়িত জার্মানিয়াম সন্ধানী** ৪৮—৭৯

২.১ ভূমিকা ; ২.২ আয়ন-তাড়িত সন্ধানী নির্মাণ ; ২.৩ আয়ন-তাড়িত সন্ধানীর মৌলিক বৈশিষ্ট্যাবলী ; ২.৪ Ge(Li) সন্ধানীর চালনা বৈশিষ্ট্য ২.৫ Ge(Li) সন্ধানী ব্যবহার করে গামারশ্মির বর্ণালিবীক্ষণ।

তৃতীয় অধ্যায় : **লিথিয়াম তাড়িত সিলিকন সন্ধানী** ৮০—৯৩

৩.১ ভূমিকা ; ৩.২ সিলিকন সন্ধানীর সাধারণ বৈশিষ্ট্য ; ৩.৩ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র ও স্পন্দের আকার ; ৩.৪ নিম্নশক্তি ফোটনের বর্ণালিবীক্ষণ ; ৩.৫ সিলিকন সন্ধানী দ্বারা ইলেকট্রন বর্ণালিবীক্ষণ।

চতুর্থ অধ্যায় : **উচ্চ বিশুদ্ধ জার্মানিয়াম ও অন্যান্য অর্ধপরিবাহী সন্ধানী** ৯৪—১০৯

৪.১ ভূমিকা ; ৪.২ অতি বিশুদ্ধ অর্ধপরিবাহী সন্ধানীর সাধারণ বৈশিষ্ট্য ; ৪.৩ উচ্চ বিশুদ্ধ অর্ধপরিবাহী সন্ধানীর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র ও আধান ধারকত্ব ; ৪.৪ স্পন্দের আকার এবং সময়কাল ; ৪.৫ অতি বিশুদ্ধ জার্মানিয়ামের গামা রশ্মি বর্ণালিবীক্ষণে প্রয়োগ ; ৪.৬ জার্মানিয়াম ও সিলিকন ছাড়া অন্যান্য অর্ধপরিবাহী পদার্থ ; ৪.৭ প্রপাত সন্ধানী ; ৪.৮ মিথস্ক্রিয়াস্থল সুবেদী অর্ধপরিবাহী সন্ধানী ; গ্রন্থপঞ্জি।

পঞ্চম অধ্যায় : **বিবিধ বিকিরণ সন্ধানী ও এদের প্রয়োগ কৌশল** ১১০—১৪৩

৫.১ ভূমিকা ; ৫.২ পরপ্রভ সন্ধানী ; ৫.৩ পটভূমি বিকিরণ এবং সন্ধানী শিল্ডিংয়ের মাধ্যমে এর প্রভাব হ্রাসকরণ ; ৫.৪ সন্ধানী শিল্ডিং ; ৫.৫ মধ্যবর্তী প্রমাণ বিকিরণপাত পরিমাপন গবেষণাগার ব্যবহার করে বিকিরণ পরিমাপক যন্ত্র ক্রমাঙ্কন ও প্রমিতকরণ।

প্রথম অধ্যায়

অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী
(Semiconductor Detector)

১.১ ভূমিকা

বিকিরণ সন্ধানের ক্ষেত্রে কঠিন অবস্থার বস্তুর ব্যবহার অনেক সুবিধাজনক। কঠিন অবস্থায় বস্তুর ঘনত্ব গ্যাসীয় পদার্থের তুলনায় প্রায় ১,০০০ গুণের বেশি। ফলে উচ্চ শক্তির ইলেকট্রন বা গামা-রে পরিমাপনে এ ধরনের সন্ধায়ীর আকার-আয়তন এর সমতুল গ্যাসীয় সন্ধায়ীর আকার-আয়তনের চেয়ে বহুগুণে ক্ষুদ্রতর হলেও অতি উত্তম কাজ সম্পাদিত হয়। প্রথম খণ্ডে দশম অধ্যায়ে বর্ণিত সিন্টিলেশন সন্ধায়ী বিভিন্ন বিকিরণ সন্ধান ও নিরূপণে একটি সম্ভাবনাময় কঠিন অবস্থার মাধ্যম বটে। তবে সিন্টিলেশন কাউন্টারের প্রধান সীমাবদ্ধতাসমূহের অন্যতম হচ্ছে শক্তি পৃথককরণে (resolution) চরম দীনতা। এর কারণ আপতিত বিকিরণের শক্তিকে প্রথমে আলোকে রূপান্তরণে এবং পরবর্তীতে বৈদ্যুতিক সংকেত উৎপাদন প্রক্রিয়ার সাথে জড়িত সংঘটনাদির শৃঙ্খলে (chain of events) অনেকগুলো অদক্ষ (inefficient) ধাপ (steps) রয়েছে। ফলে কোনো একটি তথ্য বাহক (একটি ফটোইলেককট্রন) উৎপাদনে 1000 eV বা তারও অধিকতর শক্তির প্রয়োজন হয় এবং প্রতিনিধিত্বকারী কোনো একটি মিথস্ক্রিয়ায় সৃষ্ট বাহকের (carrier) সংখ্যা সচরাচর সহস্র ছাড়িয়ে যায় না। এত ক্ষুদ্র সংখ্যক সংঘটনের পরিসংখ্যানিক উঠানামা (fluctuations) সর্বোত্তম চালনা অবস্থায়ও অর্জিত শক্তি পৃথককরণে সহজাত সীমাবদ্ধতা আনয়ন করে। একে নিয়ন্ত্রণ করে শক্তি পৃথককরণে উন্নয়ন করা যায় না।

শক্তি পৃথককরণের উপর পরিসংখ্যানিক সীমাবদ্ধতা হ্রাসের একমাত্র উপায় হচ্ছে প্রতিটি উৎপাদ স্পন্দের উৎপাদনকারী তথ্য বাহকের সংখ্যা বৃদ্ধি করা। এ অধ্যায়ের অন্যতম মূল প্রতিপাদ্য হচ্ছে যে কোনো আপতিত বিকিরণ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী পদার্থে মিথস্ক্রিয়ায় অন্যান্য সকল ধরনের সন্ধায়ীর চেয়ে যে বেশি সংখ্যক বাহক উৎপন্ন করে থাকে তা দেখানো। ফলে আজকের দিনে সর্বোত্তম শক্তি পৃথককরণ লাভ ঘটে অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী ব্যবহারের মাধ্যমে। সন্ধায়ী মাধ্যমের ভিতর দিয়ে চলার পথে তড়িৎ আধানযুক্ত কণিকা (প্রাইমারি ও সেকেন্ডারি) মৌলিক তথ্য বাহক ইলেকট্রন-হোল (electron-hole) জোড়া সৃষ্টি করে। এ ইলেকট্রন-হোল জোড়া গ্যাসীয় সন্ধায়ীতে বিকিরণপাতে সৃষ্ট ঋণ ও ধন-আয়ন

জোড়া সৃষ্টির হুবহু সদৃশ এবং প্রযুক্ত বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে এদের চলাচল সন্ধায়ীতে মৌলিক তড়িৎ স্পন্দ (basic electrical signal) উৎপন্ন করে।

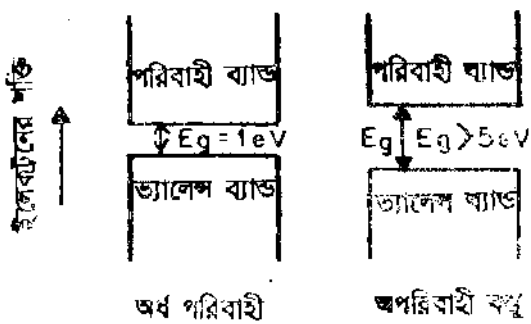
অর্ধপরিবাহী বস্তুর মৌলিক সন্ধায়ী মাধ্যমরূপে ব্যবহার বাস্তবে সম্ভব হয় ১৯৬০ সালের প্রথম দিকে। তখন তা ক্রিস্টাল কাউন্টার বলে অভিহিত হতো, কিন্তু আজকাল আধুনিক সন্ধায়ীসমূহকে অর্ধপরিবাহী ডায়োড সন্ধায়ী বা কঠিন অবস্থার সন্ধায়ী বলা হয়।

সর্বোৎকৃষ্ট শক্তি পৃথককরণ ছাড়াও অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর আরো বহু বাঞ্ছনীয় বৈশিষ্ট্য রয়েছে; তন্মধ্যে আঁটসাঁট সাইজ, তুলনামূলকভাবে দ্রুত সাড়াদান এবং প্রয়োগের প্রয়োজনীয়তা অনুযায়ী পরিবর্তনীয় কার্যকর পুরুত্ব ইত্যাদি হচ্ছে এদের প্রধান বৈশিষ্ট্য। এদের প্রধান প্রধান অসুবিধা হলো ক্ষুদ্রায়তনের সীমাবদ্ধতা এবং বিকিরণ-পাতে আবিষ্ট ক্ষয়ক্ষতির ফলে কার্য সম্পাদন দক্ষতায় অবনয়ন (degradation)।

বর্তমানে প্রাপ্ত অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর মধ্যে সিলিকন সন্ধায়ী তড়িৎ আধান-বাহী কণিকা বিকিরণের বর্ণালীবীক্ষণে সর্বাধিক উপযোগী আর জার্মানিয়াম সন্ধায়ী গামা সন্ধান তথা বর্ণালীবীক্ষণে অধিকতর উপযোগী এবং ব্যাপকভাবে ব্যবহৃত হয়ে চলেছে।

১.২ অর্ধপরিবাহী পদার্থের ধর্মাবলী (Properties)

১.২.১ কঠিন অবস্থায় পদার্থের শক্তি ব্যান্ড গঠন (band structure in solids) : কেলাসী (crystalline) পদার্থের পর্যাবৃত্ত ল্যাটিস ঐ পদার্থে বিদ্যমান ইলেকট্রনসমূহের জন্য অনুমোদিত শক্তি ব্যান্ড প্রতিষ্ঠা করে। উক্ত পদার্থের খাঁটি বস্তুতে বিদ্যমান যে কোনো ইলেকট্রন গ্যাপ বা নিষিদ্ধ শক্তি দ্বারা আলাদাকৃত এ সকল শক্তি ব্যান্ডের কোনা না কোনো একটি অনুমোদিত শক্তি স্তরে অবশ্যই আবদ্ধ থাকতে হবে।



চিত্র ১.১ : অপরিবাহী ও অর্ধপরিবাহী পদার্থে বিদ্যমান ইলেকট্রনসমূহের জন্য শক্তি ব্যান্ডের গঠন।

অপরিবাহী বা অর্ধপরিবাহীতে বিদ্যমান দরকারি ব্যান্ডসমূহের সরলীকৃত প্রতিনিধির নমুনা ১.১ চিত্রে প্রদর্শিত হলো। 'ভ্যালেন্স ব্যান্ড' (valence band) নামে

অভিহিত অপেক্ষাকৃত নিচের ব্যান্ডটি কৃস্টালের বিশেষ ল্যাটিস অবস্থানে (lattice site) আবদ্ধ ইলেকট্রনসমূহের জন্য। সিলিকন ও জার্মানিয়ামের ক্ষেত্রে এরা কৃস্টালের আন্তঃআণবিক শক্তি দ্বারা গঠিত সহযোজী অনুবন্ধের (covalent bonding) অংশ বটে। অধিকতর উঁচুতে বিদ্যমান পরবর্তী ব্যান্ডটিকে বলা হয় পরিবাহী (conduction) ব্যান্ড; কৃস্টাল জুড়ে অবাধ অভিপ্রয়াণে (migration) সক্ষম ইলেকট্রনদেরই প্রতিভূ এরা। এ ব্যান্ডের ইলেকট্রন পদার্থের বৈদ্যুতিক পরিবাহিতায় অবদান রাখে। পরিবাহী ও ভ্যালেন্স ব্যান্ডদ্বয় ব্যান্ড গ্যাপ দ্বারা বিচ্ছিন্ন থাকে আর ব্যান্ড গ্যাপের পরিমাপই বলে দেয় সংশ্লিষ্ট বস্তুটি অর্ধপরিবাহী না অপরিবাহী। কৃস্টালে বিদ্যমান ইলেকট্রনের সংখ্যা ভ্যালেন্স ব্যান্ডে বিদ্যমান অবস্থানের (sites) প্রায় সমান হয়ে থাকে। তাপায়নিক উত্তেজননের অনুপস্থিতিতে অপরিবাহী ও অর্ধ-পরিবাহী পদার্থের অবস্থানাবস্থা (configuration) এমন যে ভ্যালেন্স ব্যান্ডটি সম্পূর্ণভাবে ভরতি (full) থাকবে আর পরিবাহী ব্যান্ডটি সম্পূর্ণরূপে খালি (empty) থাকবে। এমতাবস্থায় উভয়ের মধ্যে কেউই তত্ত্বীয়ভাবে বৈদ্যুতিক পরিবাহিতা দেখাবে না।

কোনো ধাতুতে দখলীকৃত কোনো সর্বোচ্চ ব্যান্ডই পুরোপুরি ভরতি থাকে না। সুতরাং ইলেকট্রন সহজেই সারা বস্তু জুড়ে অভিপ্রয়াণ করতে পারে কেননা দখলী-কৃত এলাকার উপরে যেতে তাদের শক্তিতে অতি স্বল্প বৃদ্ধিই যথেষ্ট। অতএব এজন্যই ধাতুর অন্যতম বৈশিষ্ট্য উচ্চ বৈদ্যুতিক পরিবাহিতা। অপরদিকে অপরিবাহী অথবা অর্ধপরিবাহীতে ইলেকট্রনকে ব্যান্ড গ্যাপ ছাড়িয়ে প্রথমে পরিবাহী ব্যান্ডে যেতে হবে। তাই এদের পরিবাহিতা বেশ কয়েক গুণ কম। অপরিবাহী বস্তুর ক্ষেত্রে ব্যান্ড গ্যাপটি সাধারণত 5eV বা ততোধিক কিন্তু অর্ধপরিবাহীর ক্ষেত্রে এর চেয়ে বেশ কম হয়ে থাকে।

১.২.২ তড়িৎ আধান বাহক (Charge carriers) : পরম শূন্য তাপমাত্রার ($0^{\circ}K$) উপরে যে কোনো তাপমাত্রায় কৃস্টালস্থ ইলেকট্রন তাপীয় শক্তির ভাগ কিছুটা নেয়। একটি ভ্যালেন্স ইলেকট্রন পর্যাপ্ত তাপীয় শক্তি অর্জনের মাধ্যমে ব্যান্ড গ্যাপ ছাড়িয়ে পরিবাহী ব্যান্ডে উঠে যেতে পারে। ভৌত অবস্থায় প্রক্রিয়াটি একটি ইলেকট্রনের উত্তেজনার প্রতিনিধিত্ব করে থাকে। সংশ্লিষ্ট ইলেকট্রনটি অবশ্য একটি সহযোজী অনুবন্ধের জরুরি অংশ বটে। ইলেকট্রনটি সুনির্দিষ্ট অনুবন্ধন (bonding) অবস্থান ত্যাগ করে সমগ্র কৃস্টাল জুড়ে সঞ্চরণ করতে পারে। উত্তেজনন প্রক্রিয়াটি খালি পরিবাহী ব্যান্ডে ইলেকট্রনই সৃষ্টি করে না, তা অন্য দিকে পূর্ণ ভ্যালেন্স ব্যান্ডে একটি আধান ফাঁকা জায়গাও (vacancy) সৃষ্টি করে যা হোল (hole) নামে সমধিক পরিচিত। ইলেকট্রন ও হোলের এ সন্নিবেশকে ইলেকট্রন-হোল জোড়া বলা হয় এবং তা মোটামুটিভাবে কঠিন অবস্থার পদার্থে গ্যাসীয়

মাধ্যমের আয়ন জোড়ার হুবহু সদৃশ তা আগেই বলা হয়েছে। পরিবাহী ব্যান্ডস্থ ইলেকট্রনকে বিভব প্রয়োগের দ্বারা চলাচল করানো যায়, ধন-আয়নের প্রতিনিধি-স্বরূপ হোলটিও বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে চলাচল করে তবে এর চলার দিকটি জোড়াস্থ ইলেকট্রনটির ঠিক বিপরীত দিকে। অবশ্য এ উভয় তড়িৎ আধানের গতির ফলেই বস্তুতে পর্যবেক্ষিত পরিবাহিতা ঘটে।

প্রতি একক সময়ে এক জোড়া ইলেকট্রন-হোল তাপীয়ভাবে (thermally) উৎপাদিত হওয়ার সম্ভাব্যতা (probability) হচ্ছে :

$$p(T) = C\, T^{3/2} \exp\left(-E_g/2KT\right) \qquad (১.১)$$

যেখানে,

T = পরম তাপমাত্রা

E_g = ব্যান্ড গ্যাপের শক্তি

K = বোলৎস্‌ম্যান (Boltzmann) ধ্রুবক, এবং

C = সংশ্লিষ্ট পদার্থটির বৈশিষ্ট্যমূলক সমানুপাতিক ধ্রুবক।

সমীকরণ ১.১ এর সূচকীয় পদ (exponential term) থেকে দেখা যায় তাপায়নিক উত্তেজননের সম্ভাব্যতা ক্রান্তিগতভাবেই (critically) ব্যান্ড গ্যাপ শক্তি ও পরম তাপমাত্রার মধ্যে বিদ্যমান অনুপাতের উপর নির্ভরশীল। ব্যাপক পরিসরের ব্যান্ড গ্যাপ-ধারী পদার্থের তাপায়নিক উত্তেজননের সম্ভাব্যতা স্বল্প বিধায় অপরিবাহীর ন্যায় অত্যন্ত নিম্নমানের পরিবাহিতা প্রদর্শন করে। আর ব্যান্ড গ্যাপটি পর্যাপ্ত পরিমাণে নিম্নমানের যেমন কতিপয় eV হলে যথেষ্ট পরিমাণের তাপায়নিক উত্তেজনন এমন উচ্চ পরিবাহিতা সৃষ্টি করবে যে বস্তুটিকে অর্ধপরিবাহীর শ্রেণিভুক্ত করা চলবে। প্রযুক্ত তড়িৎ ক্ষেত্রের অনুপস্থিতিতে তাপায়নে সৃষ্ট ইলেকট্রন-হোল জোড়া সবশেষে পুনর্মিলিত হয়ে এমন এক ভারসাম্যাবস্থার সৃষ্টি করবে যে এক সময় ইলেকট্রন-হোল জোড়ার পুনর্মিলন এদের সৃজন হারের সমানুপাতিক হবে। সমীকরণ ১.১ থেকে দেখা যায় যে এ সাম্যাবস্থায় গাঢ়ত্ব তাপমাত্রার জোরালো ফাংশন এবং বস্তুটিকে ঠাণ্ডা করার সাথে সাথে তীব্রতা আকস্মিকভাবে হ্রাস পায়।

১.২.৩ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে তড়িৎ আধান বাহকের অভিপ্রয়াণ (Migration of charge carriers in an electric field) : অর্ধপরিবাহী পদার্থে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র প্রয়োগে ইলেকট্রন ও হোল (hole) উভয়েরই নিট (net) অভিপ্রয়াণ ঘটে। লব্ধ গতি হচ্ছে তাপায়নজনিত এলোমেলো বেগ ও প্রযুক্ত বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের সমান্তরাল বরাবরে নিট তাড়ন (drift) বেগের সমাবেশ (combination)। ইলেকট্রনের চলাচলের রূপকল্পনা (visualization) তুলনামূলকভাবে সহজ প্রক্রিয়া হলেও হোলও যে পরিবাহিতায় অবদান রাখে তা স্পষ্টত প্রতীয়মান নয়। একটি ইলেকট্রন

স্বাভাবিক ভ্যালেন্স অবস্থান (valence site) ছেড়ে বিদ্যমান কোনো ফাঁকা স্থান ভরতি করতে গেলেই হোলটির এক জায়গা থেকে অন্য জায়গায় যাওয়া হয়। ইলেকট্রনটি চলার পথে পিছনে যে শূন্যতা (vacancy) ফেলে রেখে যায় তাই তখন হোল-এর নতুন অবস্থানের প্রতিনিধিত্ব করে। যেহেতু ইলেকট্রন তড়িৎ ক্ষেত্রের দিকের বিপরীতমুখে অগ্রাধিকার ভিত্তিতে আকৃষ্ট হয়ে থাকে তাই হোল তড়িৎ ক্ষেত্রের অভিমুখে চলে ; এ আচরণ বিন্দুবত ধন-তড়িৎ আধানের প্রত্যাশিত আচরণেরই মতো, কেননা হোলটি (hole) একটি ঋণ-তড়িৎ আধানের অনুপস্থিতির প্রতিনিধিত্ব করে।

বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের নিম্ন থেকে মধ্যম তীব্রতায় (intensity) তাড়ন বেগ (drift velocity) 'v' প্রযুক্ত বৈদ্যুতিক বিভবের সমানুপাতিক হয়ে থাকে। এমতাবস্থায় ইলেকট্রন ও হোল-এর চলিষ্ণুতা (mobility) দাঁড়ায় :

$$v_h = \mu_h E \qquad (১.২)$$

$$v_e = \mu_e E \qquad (১.৩)$$

যেখানে E হচ্ছে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের পরিমাণ। গ্যাসীয় মাধ্যমে মুক্ত ইলেকট্রনের চলিষ্ণুতা ধন-আয়নের চেয়ে বহুগুণে বেশি কিন্তু অর্ধপরিবাহী পদার্থে ইলেকট্রন ও হোল-এর চলিষ্ণুতা প্রায় একই হয়। সচরাচর ব্যবহৃত অর্ধপরিবাহী বস্তু যেমন, জার্মানিয়াম ও সিলিকনের সংখ্যাবাচক মান ১.১ সারণিতে প্রদান করা হলো।

সারণি ১.১ : সিলিকন ও জার্মানিয়ামের সহজাত ধর্মাবলী।

	সিলিকন (Si)	জার্মানিয়াম (Ge)
পারমাণবিক সংখ্যা	14	32
পারমাণবিক ওজন	28.09	72.60
ঘনত্ব (300K) ; g/cm^3	2.33	5.33
পরমাণু/(সে.মি.)^3	4.96×10^{22}	4.41×10^{22}
ডাই-ইলেকট্রিক ধ্রুবক	12	16
নিষিদ্ধ শক্তি গ্যাপ (300K) ; eV	1.115	0.665
নিষিদ্ধ শক্তি গ্যাপ (0K) ; eV	1.165	0.746
সহজাত বাহক ঘনত্ব (300K) ; cm^{-3}	1.5×10^{10}	2.4×10^{13}

সহজাত রোধকত্ব (300K) ; Ω cm	2.3×10^5	47
ইলেকট্রনের চলিষ্ণুতা (300K) $cm^2/v\text{-}s$	1350	3900
হোল এর চলিষ্ণুতা (300K) $cm^2/v\text{-}s$	480	1900
ইলেকট্রনের চলিষ্ণুতা (77K) $cm^2/v\text{-}s$	2.1×10^4	3.6×10^4
হোল এর চলিষ্ণুতা (77K) $cm^2/v\text{-}s$	1.1×10^4	4.2×10^4
প্রতি হোল-ইলেকট্রন জোড়ায় শক্তি (77K) দরকার , eV	3.76	2.96

উচ্চতর মানের বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের বেলায় তাড়ন বেগ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র বৃদ্ধির সাথে অধিকতর ধীরভাবে বৃদ্ধি পায়। অবশেষে এমন একটি সংপৃক্তি (saturation) বেগে পৌঁছে যা বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের আরো বৃদ্ধির উপর নির্ভরশীল থাকে না।

অধিকাংশ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীই (detector) এমন পর্যাপ্ত উচ্চ বিভবে চালানো হয় যেন আধান বাহকের সংপৃক্তি বেগ ঘটে। যেহেতু সংপৃক্তি বেগ প্রায় 10^7 সে.মি./সেকেন্ড এর মত হয়ে থাকে, তাই 0.1 সে.মি. বা তার কম বৈশিষ্ট্যসূচক (typical) দূরত্বে আধান বাহক সংগ্রহের সময় 10×10^{-9} সেকেন্ডের কম হয়ে থাকে। অতএব দেখা যায় অর্ধপরিবাহী ধরনের সন্ধায়ী দ্রুততম সাড়াদানকারী ধরনের সন্ধায়ীসমূহের অন্যতম।

১.২.৪ খাদ এবং ডোপ পদার্থের প্রভাব (Effects of impurities and dopants)

১.২.৪.১ সহজাত (intrinsic) **অর্ধপরিবাহী পদার্থ ঃ** সম্পূর্ণরূপে খাঁটি একটি অর্ধপরিবাহীতে পরিবাহী ব্যান্ডস্থ সমুদয় ইলেকট্রন এবং ভ্যালেন্স ব্যান্ডস্থ সমুদয় হোল তাপায়নিক উত্তেজননে সৃষ্টি হয়ে থাকে (আয়নায়ক বিকিরণের অনুপস্থিতিতে)। কেননা এমন অবস্থাধীনে প্রতিটি ইলেকট্রন তার পেছনে পেছনে অবশ্য একটি হোল রেখে যায় ; সুতরাং পরিবাহী ব্যান্ডস্থ ইলেকট্রনের সংখ্যা ভ্যালেন্স ব্যান্ডস্থ হোল এর সংখ্যার সমান হবে। এ ধরনের অর্ধপরিবাহীসমূহকে সহজাত অর্ধপরিবাহী বলে। এগুলোর ধর্মাবলী (properties) তত্ত্বীয়ভাবে বর্ণনা করা যায় কিন্তু বাস্তবে অর্জন করা অসম্ভব। বাস্তব পদার্থসমূহের বৈদ্যুতিক ধর্মাবলী অতি স্বল্প পরিমাণে বিদ্যমান অবশেষ (residual) খাদ দ্বারা কর্তৃত্বকৃত (dominated) হয়ে থাকে, সর্বোচ্চ ব্যবহারিক বিশুদ্ধতায় প্রাপ্ত অর্ধপরিবাহী পদার্থ সিলিকন ও জার্মানিয়ামের ক্ষেত্রেও এ ধর্ম সমভাবে সত্য।

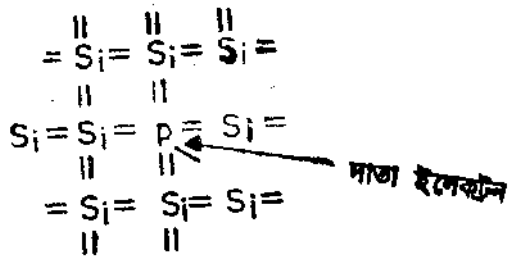
পরিবাহী ব্যান্ডের একক আয়তনে ইলেকট্রন গাঢ়ত্ব n হলে এবং ভ্যালেন্স ব্যান্ডে হোল এর গাঢ়ত্ব p হলে সহজাত অর্ধপরিবাহী পদার্থে ভ্যালেন্স ব্যান্ড

থেকে তাপায়নিক উত্তেজননে পরিবাহী ব্যান্ডে যাওয়া ইলেকট্রনের সাম্যাবস্থা এবং পরবর্তী পুনর্মিলনে ইলেকট্রন ও হোল এর সংখ্যা সমান হয়, অর্থাৎ

$$n = p \qquad (১.৪)$$

n ও p কে সহজাত বাহক গাঢ়ত্ব বলা হয়। ১.১ সমীকরণ থেকে দেখা যায় যে বিশাল ব্যান্ডগ্যাপধারী পদার্থের ক্ষেত্রে এগুলির গাঢ়ত্ব নিম্নতম এবং নিম্ন তাপমাত্রায়ও তা ঘটে। ১.১ সারণি থেকে দেখা যায় যে গৃহ তাপমাত্রায় সহজাত হোল বা ইলেকট্রন ঘনত্ব সিলিকনে $1.5 \times 10^{10}/(\text{সে.মি.})^3$ এবং জার্মানিয়ামে $2.4 \times 10^{13}/(\text{সে.মি.})^3$।

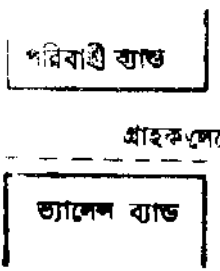
১.২.৪.২ n-type অর্ধপরিবাহী পদার্থ : অর্ধপরিবাহীর ধর্মের উপর ডোপায়নের প্রভাব ব্যাখ্যায় কেলাসিত সিলিকনের বিষয়টি উদাহরণস্বরূপ আলোচনা করা হলো। জার্মানিয়াম ও অন্যান্য অর্ধপরিবাহীও একই ধরনের আচরণ করে থাকে। চতুর্যোজী সিলিকন স্বাভাবিক কেলাসিত অবস্থায় সন্নিকটস্থ চারটি পরমাণুর সাথে সহযোজী অণুবন্ধ গড়ে তুলে। এ পরিস্থিতির একটি নক্সা ১.২ চিত্রে দেখানো হলো।



চিত্র ১.২ : দাতা খাদের (ফসফরাস) প্রতিনিধিত্বের (সিলিকন কেলাসে প্রতিস্থাপনীয় অবস্থান দখল করে রয়েছে) নমুনা চিত্র।

১.২ চিত্রে প্রতিটি ড্যাশ সহযোজী অণুবন্ধে জড়িত একটি স্বাভাবিক ভ্যালেন্স ইলেকট্রনের প্রতিনিধিত্ব করে। সহজাত পদার্থে তাপায়নিক উত্তেজনন এ সহযোজী ইলেকট্রনসমূহের কোনো একটিকে অণুবন্ধ ভেঙ্গে মুক্ত করে দেয় আর পিছনে পড়ে থাকে অসংপৃক্ত অণুবন্ধ বা হোল। এবার সর্বোত্তম বিশুদ্ধকরণের পরেও থেকে যাওয়া খাদের অবশেষ বা পদার্থের ধর্মের হেরফের ঘটানোর উদ্দেশ্যে ইচ্ছাকৃতভাবে যোগ করা অতি সামান্য গাঢ়ত্বের খাদের অর্ধপরিবাহীর উপর প্রভাব কি তা দেখা যাক। ধরা যাক খাদটি পঞ্চযোজী অথবা পর্যায় সারণির পঞ্চম গ্রুপের কোনো উপাদান। অত্যন্ত স্বল্প গাঢ়ত্বে (মিলিয়ন ভাগের অল্প কয়ভাগ বা

তারও কম পরিমাণে) বিদ্যমান থাকলে অপদ্রব্যের (impurity) পরমাণু ল্যাটিসের মধ্যকার প্রতিস্থাপনীয় (substitutional) অবস্থান দখল করে স্বাভাবিক সিলিকন পরমাণুর জায়গাটি নিয়ে নেবে। যেহেতু অপদ্রব্যের পরমাণুটিকে ঘিরে পাঁচটি ভ্যালেন্স ইলেকট্রন বিরাজ করে তাই চারটি সহযোজী অণুবন্ধ পূর্ণ হওয়ার পর একটি অণুবন্ধ মুক্ত থেকে যাবে। এ বাড়তি ইলেকট্রনটি অনেকটা অনাথের মত এবং আদি অপদ্রব্য স্থলে অতি আলগাভাবে আবদ্ধ থাকে। সুতরাং সদৃশ হোল সৃজন না করেও একটি পরিবাহী ইলেকট্রন গড়ার জন্য একে আবাসস্থল থেকে উৎখাত করতে খুবই স্বল্প শক্তি লাগে। এ ধরনের অপদ্রব্যসমূহকে দাতা অপদ্রব্য-রূপে উল্লেখ করা হয় কারণ এরা অবলীলাক্রমে পরিবাহী ব্যান্ডে ইলেকট্রন দান করে। যেহেতু এগুলো নিয়মিত ল্যাটিসের অংশ নয় তাই দাতা অপদ্রব্যের সাথে সংযুক্ত বাড়তি ইলেকট্রন স্বাভাবিক নিষিদ্ধ গ্যাপে স্থান দখল করে নিতে পারে। অত্যন্ত আলগাভাবে আবদ্ধ এসব ইলেকট্রনের শক্তি নিষিদ্ধ শক্তি গ্যাপের শিরো-ভাগে হবে (চিত্র ১.৩)। এসব দাতা শক্তিস্তর ও পরিবাহী ব্যান্ডের তলদেশের



চিত্র ১.৩ : সিলিকন ব্যান্ড গ্যাপে সৃষ্ট দাতা লেভেলের (donor level) নমুনা চিত্র।

মধ্যেকার শক্তি দূরত্ব (energy spacing) যথেষ্ট স্বল্প বিধায় সমীকরণ ১.১-এ বিবৃত তাপীয় উত্তেজননের সম্ভাব্যতা দাতা অপদ্রব্যের এক বিরাট অংশ আয়নিত হওয়ার নিশ্চয়তা প্রদানের মত যথেষ্ট উচ্চ হয়ে থাকে। প্রায় সব ক্ষেত্রেই অপদ্রব্যের ঘনত্ব, N_D সহজাত বস্তুর পরিবাহী ব্যান্ডে প্রত্যাশিত ইলেকট্রনের ঘনত্বের তুলনায় বড়। সুতরাং পরিবাহী ইলেকট্রনের সংখ্যা দাতা অপদ্রব্যের অবদান দ্বারা সম্পূর্ণরূপে নিয়ন্ত্রিত হয়। এমতাবস্থায়,

$$n \simeq N_D \qquad (১.৫)$$

হয়। সহজাত অবস্থায় ইলেকট্রন ঘনত্বের পরিবাহী ব্যান্ডে বাড়তি ইলেকট্রন ঘনত্ব পুনর্মিলনের হার বাড়িয়ে ইলেকট্রন ও হোল এর মধ্যে বিদ্যমান ভারসাম্যাবস্থা

পরিবর্তন করে। ফলে হোল এর ভারসাম্য ঘনত্ব এমন হ্রাস পায় যেন :

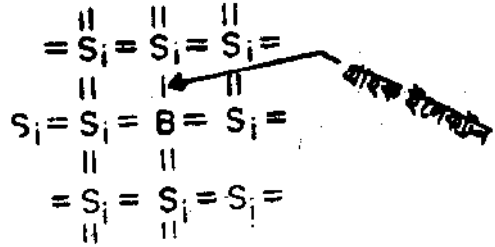
$$np = n_i p_i \qquad (১.৬)$$

হয়। উদাহরণের সাহায্যে বিষয়টি বিশদ ব্যাখ্যা করা হলো : গৃহ তাপমাত্রায় সিলিকনের সহজাত বাহক ঘনত্ব প্রায় $10^7/(\text{সে.মি.})^3$। এতে দাতা অপদ্রব্যের পরমাণুর ঘনত্ব $10^{17}/(\text{সে.মি.})^3$ (প্রতি মিলিয়নে প্রায় 2 ভাগ) হলে পরিবাহী ইলেকট্রনের (n) ঘনত্ব হবে $10^{17}/(\text{সে.মি.})^3$ এবং হোল p এর ঘনত্ব হবে $10^3/(\text{সে.মি.})^3$।

এমতাবস্থায় পরিবাহী ইলেকট্রনের সংখ্যা হোলের সংখ্যা থেকে বেশি হলেও আয়নিত দাতা অপদ্রব্যের উপস্থিতির দরুন তড়িৎ আধান নিরপেক্ষতা বজায় থাকে। এ সকল অবস্থান নিট ধন তড়িৎ আধানের প্রতিনিধিত্ব করে এবং বাড়তি ইলেকট্রন আধানকে ভারসাম্য করে। এদেরকে হোল বলা যাবে না কেননা আয়নিত দাতা-সমূহ ল্যাটিসে আবদ্ধ থাকে এবং অভিপ্রয়াণ করতে পারে না।

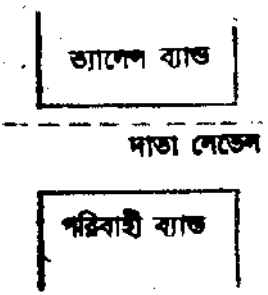
অতএব দেখা যায় n-type অর্ধপরিবাহীতে নিট প্রভাব হচ্ছে এমন পরিস্থিতির সৃষ্টি যেন ডোপিত পদার্থটিতে পরিবাহী ইলেকট্রনের সংখ্যা খাঁটি অবস্থায় পদার্থটিতে বিদ্যমান পরিবাহী ইলেকট্রনের চেয়ে বহু গুণে বেশি হয় আর হোল এর সংখ্যা স্বল্পতর হয়। এমন অবস্থায় বৈদ্যুতিক পরিবাহিতা আর সব বাদ দিয়ে ইলেকট্রনের একচেটিয়া প্রবাহের দ্বারা নিয়ন্ত্রিত হয় ; হোল এর তেমন কোনো প্রভাব থাকে-না। এ ক্ষেত্রে ইলেকট্রনকে সংখ্যাগরিষ্ঠ (majority) আর হোলকে সংখ্যালঘিষ্ঠ বাহক (minority carrier) বলা হয়।

১.২.৪.৩ P-type **অর্ধ-পরিবাহী পদার্থ** : কোনো ত্রিযোজী অপদ্রব্য যেমন উপাদানের পর্যায় সারণির (periodic table of elements) তৃতীয় গ্রুপের অন্তর্ভুক্ত কোনো উপাদান সিলিকন ল্যাটিসে সংযোগের ফলে ১.৪ চিত্রে দেখানো



চিত্র ১.৪ : গ্রাহক অপদ্রব্যের (বোরন) সিলিকন কেলাসে প্রতিস্থাপনীয় অবস্থান দখলের প্রতিনিধিত্বের নক্‌শা।

পরিস্থিতির উদ্ভব হয়। অপদ্রব্যটি কোনো প্রতিস্থাপনীয় স্থান দখল করলে একে ঘিরে থাকা সিলিকন পরমাণুর চেয়ে তাতে একটি ভ্যালেন্স ইলেকট্রন কম থাকে। সুতরাং একটি সহযোজী অনুবন্ধ অসংপৃক্ত থেকে যায়। এ শূন্যতা স্বাভাবিক কোনো ভ্যালেন্স ইলেকট্রন উত্তেজননের ফলে পরিবাহী ব্যান্ডে উঠে গেলে যেমন একটি হোলকে পেছনে ফেলে যায় ঠিক তেমনি একটি হোল এর প্রতিনিধিত্ব করে কিন্তু এর শক্তির বৈশিষ্ট্য কিছুটা ভিন্ন। এ শূন্যতাটি পূরণের জন্য কোনো ইলেকট্রন গ্রাস করলে এটি সহযোজী অনুবন্ধে অংশ নেয় ঠিকই কিন্তু কেলাসের প্রধান অংশের সাথে অভিন্ন হয় না কেননা অংশগ্রহণকারী পরমাণুদ্বয়ের একটি ত্রিযোজী অপদ্রব্য। এ শূন্য স্থান পূরণকারী ইলেকট্রনটি যদিও একটি বিশেষ অবস্থানে আবদ্ধ, তথাপিও একটি বৈশিষ্ট্যসূচক ভ্যালেন্স ইলেকট্রনের চেয়ে স্বল্পতর দৃঢ়ভাবে আবদ্ধ বটে। সুতরাং এ সকল গ্রাহক (acceptor) অপদ্রব্যও স্বাভাবিকভাবে নিষিদ্ধ শক্তি গ্যাপে ইলেকট্রনের অবস্থানস্থল তৈরি করে। এ ক্ষেত্রে গ্রাহক লেভেল গ্যাপের তলদেশে অবস্থান নেয় কেননা তাদের ধর্ম স্বাভাবিক ভ্যালেন্স ইলেকট্রন দ্বারা দখলকৃত স্থানের ধর্মাবলীর প্রায় কাছাকাছি বৈশিষ্ট্যের হয়ে থাকে (চিত্র ১.৫)।



চিত্র ১.৫ : সিলিকনের ব্যান্ড গ্যাপে সৃষ্ট সংশ্লিষ্ট গ্রাহক লেভেলের বর্ণনা।

ক্রিস্টালে স্বাভাবিক তাপীয় (thermal) উত্তেজনন নিশ্চিত করে যে গ্রাহক অপদ্রব্য কর্তৃক সৃষ্ট শূন্যতা পূরণের জন্য সর্বদাই কিছু ইলেকট্রন পাওয়া যাবে (চিত্র ১.৫)।

যেহেতু বৈশিষ্ট্যগত গ্রাহক অবস্থান এবং ভ্যালেন্স ব্যান্ড এর শিরোভাগের মধ্যে শক্তির পার্থক্য স্বল্প তাই সকল গ্রাহক অবস্থানের বেশিরভাগ অংশই তাপীয়ভাবে উত্তেজিত ইলেকট্রনের দ্বারা ভরতি হয়ে থাকে। এসব ইলেকট্রন ক্রিস্টাল জুড়ে অন্যান্য স্বাভাবিক সহযোজী অনুবন্ধ থেকে আসে এবং সেজন্য ভ্যালেন্স ব্যান্ডে হোল সৃষ্টি হয়। সংযোগকারী প্রতিটি গ্রাহক অপদ্রব্যের জন্যই ভ্যালেন্স ব্যান্ডে প্রায় একটি করে উদ্বৃত্ত ইলেকট্রন সৃষ্টি হয়। গ্রাহক অপদ্রব্যের ঘনত্ব, N'_A সহজাত হোল এর ঘনত্ব p এর তুলনায় বেশ বড় হলে হোল এর সংখ্যার উপর গ্রাহকের ঘনত্ব পুরোপুরি প্রাধান্য বিস্তার করে বা

$$P \simeq N_A \qquad (১.৬ক)$$

হোলের বর্ধিত প্রাপ্যতা পরিবাহী ইলেকট্রন ও হোলের পুনর্মিলনের সম্ভাব্যতা

বৃদ্ধি করে। ফলে পরিবাহী ইলেকট্রনের সাম্যাবস্থায় বিরাজমান সংখ্যা হ্রাস পায়। p-type অর্ধপরিবাহীতে হোল হচ্ছে সংখ্যাগরিষ্ঠ বাহক (majority carrier) এবং বৈদ্যুতিক পরিবাহিতায় প্রাধান্য বিস্তার করে। পরিপূর্ণ গ্রাহক অবস্থান হোলের ঘন-আধান ভারসাম্যকারী আবদ্ধ ঋণ তড়িৎ আধানের প্রতিনিধিত্ব করে।

অর্ধপরিবাহী পদার্থে অপদ্রব্যের পরিমাণ জানার জন্য বৈদ্যুতিক পরিবাহিতা বা রোধকত্ব (resistivity) পরিমাপ করা যায়। ১.১ সারণিতে বিবৃত তত্ত্বীয় রোধকত্ব ব্যবহারিক ক্ষেত্রে পাওয়া যায় না তার কারণ অপরিহার্য অবশেষ (residual) অপদ্রব্যের উপস্থিতি। অধুনা অর্জিতব্য সর্বশেষ উন্নীত প্রযুক্তি প্রয়োগেও সিলিকনের ক্ষেত্রে রোধকত্ব 50,000 ওহম-সে.মি. পর্যায়ে মাত্র পৌঁছানো গেছে অথচ এর তত্ত্বীয় মান 2,00,000 ওহম-সেন্টিমিটারেরও উপরে।

গৃহ তাপমাত্রায় রোধকত্বের প্রভাব জার্মানিয়ামের চেয়ে সিলিকনের উপর অধিকতর। নিম্নতর ব্যান্ড গ্যাপ শক্তির দরুন জার্মানিয়ামে তাপায়নে উত্তেজিত ইলেকট্রন-হোল জোড়ার সংখ্যা প্রচুর বলে সহজাত রোধকত্বকে যথাযথ পরিবর্তনের জন্য অধিকতর ঘনত্বের অপদ্রব্য প্রয়োজন হয়। উদাহরণস্বরূপ p-type বস্তুর জন্য সিলিকনে প্রতি ঘন সেন্টিমিটারে (cm^{-3})10^{13} সংখ্যক অপদ্রব্যের পরমাণু থাকলে রোধকত্ব হয় প্রায় 500 ওহম-সে.মি. যা সহজাত রোধকত্ব 10^5 ওহম-সে.মি. এর চেয়ে বহুগুণে স্বল্পতর বটে। অপর দিকে জার্মানিয়ামে একই ঘনত্বের অপদ্রব্য তেমন কোনো পরিবর্তনই আনয়ন করতে পারে না। কিন্তু জার্মানিয়ামকে তরল নাইট্রোজেনের তাপমাত্রায় ঠাণ্ডা করলে সহজাত রোধকত্ব অপদ্রব্যের একই ঘনত্বের দ্বারা বহুগুণে হ্রাস পায়।

১.২.৪.৪ **প্রতিবিহিত** (compensated) **অর্ধপরিবাহী পদার্থ :** দাতা (donor) ও গ্রাহক অপদ্রব্য একই ঘনত্বে কোনো অর্ধপরিবাহীতে বিদ্যমান থাকলে পদার্থটিকে প্রতিবিহিত বলা হয়। এ ধরনের পদার্থের সহজাত অর্ধপরিবাহী পদার্থের কিছু কিছু ধর্ম থাকে কেননা দাতা অপদ্রব্য কর্তৃক দেয়া ইলেকট্রন গ্রাহক অপদ্রব্যের অবস্থানে গ্রাস করা হয়ে থাকে। বাস্তবে প্রস্তুতকালে যথাযথ প্রতিবিধান অর্জন করা সম্ভব হয় না কেননা দাতা ও গ্রাহকের ঘনত্বের সামান্যতম পার্থক্যই দ্রুত n-type বা p-type আচরণ আবিষ্ট করে দেয়। বর্তমানে প্রতিবিধান অর্জনের একমাত্র উপায় হচ্ছে বিপুল আয়তনের জার্মানিয়াম ও সিলিকন কৃস্টালে লিথিয়াম আয়ন তাড়ন পদ্ধতি (drifting process) প্রয়োগ করা।

১.২.৪.৫ **বোঝাইকৃত ডোপিত পদার্থ** (Heavy doped material) : অস্বাভাবিক উচ্চ ঘনত্বের অপদ্রব্যযুক্ত পাতলা স্তরের অর্ধপরিবাহী বস্তুকে প্রায়ই বিশেষ সংকেত চিহ্ন দেয়া হয়। এভাবে n^+ ও p^+ চিহ্নিত বোঝাইকৃতভাবে ডোপিত বস্তু যথাক্রমে n-type ও p-type স্তরদের নির্দেশ করে। এদের রয়েছে উচ্চ

পরিবাহিতা। এদেরকে অর্ধপরিবাহী যন্ত্র কৌশল সংযোগস্থলে বৈদ্যুতিক সংযোগ সাধনের জন্য ব্যবহার করা হয়। কারণ এদের অতি স্বল্প সংখ্যক বাহক ঘনত্ব প্রতিরোধ (blocking) সংযোগ হিসেবে নিজেদের প্রদান করে।

১.২.৫ বাহকের ফাঁদে পতন এবং পুনর্মিলন (Trapping and recombination) : কোনো অর্ধপরিবাহীতে একবার ইলেকট্রন ও হোল গঠনের পর এগুলো স্বতস্ফূর্তভাবে অথবা প্রযুক্ত বিভবের প্রভাবে অভিপ্রয়াণে ঝুঁকে পড়বে এবং তড়িৎদ্বারে সংগৃহীত বা পুনর্মিলিত না হওয়া অবধি অভিপ্রয়াণ করে চলবে। তত্ত্বীয়ভাবে পূর্বাভাস মেলে যে পুনর্মিলনের পূর্ব পর্যন্ত একটি আধান বাহকের সম্পূর্ণরূপে বিশুদ্ধ অর্ধপরিবাহীতে জীবনকাল সুদীর্ঘ এক সেকেন্ড পর্যন্ত হতে পারে। বস্তুতে থেকে যাওয়া অতি স্বল্প পরিমাণ অপদ্রব্য বাহকের জীবনকাল সম্পূর্ণ নিয়ন্ত্রণ করে বিধায় ব্যবহারিক ক্ষেত্রে এক সেকেন্ডের তিন থেকে চার গুণ স্বল্পতর জীবন হয়ে থাকে। কতিপয় অপদ্রব্য যেমন: সোনা, দস্তা, ক্যাডমিয়াম বা অন্যান্য ধাতব পরমাণু প্রতিস্থাপনীয় ল্যাটিসস্থল দখল করে নিষিদ্ধ ব্যান্ডের মাঝ বরাবরে শক্তি স্তর সৃষ্টি করে। এদেরকে গভীরে প্রোথিত অপদ্রব্য (deep impurities) বলা হয়। উল্লেখ্য যে নিষিদ্ধ ব্যান্ডের কিনারায় বিদ্যমান তদনুরূপ শক্তিস্তরের 'অগভীর অপদ্রব্য' (shallow impurities) বলা হয়। গভীরে প্রোথিত অপদ্রব্য আধান বাহকের জন্য ফাঁদরূপে কাজ করে কেননা একটি হোল অথবা ইলেকট্রন এতে গ্রাসিত (captured) হলে দীর্ঘ সময়ের জন্য আবদ্ধ হয়ে পড়ে। আর অবশেষে এটি মুক্ত হয়ে প্রত্যাবর্তন করলেও বিলম্বের দরুন উৎপাদ তড়িৎ স্পন্দে কোনো অবদান রাখতে পারে না। অন্যান্য ধরনের গভীরে প্রোথিত অপদ্রব্যাদি পুনর্মিলন কেন্দ্ররূপে কাজ করে। এসব অপদ্রব্য সংখ্যাগরিষ্ঠ ও সংখ্যালঘিষ্ঠ উভয় ধরনের বাহক গ্রাস করতে ও বিনাশে সক্ষম। উদাহরণস্বরূপ নিষিদ্ধ গ্যাপের মাঝ বরাবরে অবস্থিত অপদ্রব্য লেভেল প্রথমে একটি পরিবাহী ইলেকট্রনকে গ্রাস করে নিয়ে কিছুকাল পরে ভ্যালেন্স ব্যান্ড থেকে একটি হোলকে গ্রাস করতে পারে ; এমতাবস্থায় ইলেকট্রনটি হোলকে পূরণ করে ফেলল। এরূপে অপদ্রব্য স্থলটি আদি অবস্থায় ফিরে গেল এবং পুনরায় অপর একটি পুনর্মিলন ঘটানোর উপযোগী হয়ে গেল। অধিকাংশ কৃস্টালেই এ ধরনের পুনর্মিলন কেন্দ্রের মাধ্যমে পুনর্মিলন সমগ্র ব্যান্ড গ্যাপ অতিক্রমণের মাধ্যমে ইলেকট্রন ও হোল এর সরাসরি পুনর্মিলনের চেয়ে বহু বহু গুণে অধিকতর।

ফাঁদে আটকা পড়া এবং পুনর্মিলনের ফলে আধান বাহকের অপচয় ঘটে এবং কৃস্টালে এদের গড় আয়ু হ্রাসপ্রাপ্ত হয়। একটি উত্তম বিকিরণ সন্ধায়ীরূপে কাজ করার জন্য আপতিত বিকিরণের গমনের দরুন সৃষ্ট আধান বাহকের অধিকাংশই

(শতকরা একশত ভাগই কাম্য) সংগৃহীত হওয়া প্রয়োজন। এ শর্ত তখনই পূরণ হবে যখন বাহকসমূহের সংগ্রহকাল তাদের গড় জীবনের তুলনায় হ্রস্ব হবে। প্রায় 10^{-8} থেকে 10^{-7} সে. ব্যাপী সংগ্রহকাল সচরাচর পাওয়া যায়; অতএব 10^{-5} সে. বা বেশি সময়ব্যাপী বাহকের জীবনকালই পর্যাপ্ত।

অর্ধপরিবাহীর ব্যাপকভাবে উদ্ধৃত অপর বৈশিষ্ট্য বিবরণটি (specification) হচ্ছে পদার্থটির ফাঁদ দৈর্ঘ্য (trapping length)। এর পরিমাপ হলো পুনর্মিলন বা ফাঁদে আবদ্ধ হওয়ার পূর্ব অবধি বাহকের গড় অতিক্রান্ত দূরত্ব যা হচ্ছে গড় আয়ু ও গড় ঘাত বেগের গুণফল। গ্রহণযোগ্য সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে ভৌত মাত্রা সাপেক্ষে ফাঁদ দৈর্ঘ্য দীর্ঘ হওয়া উচিত যাতে এর সব দৈর্ঘ্য জুড়েই আধান সংগ্রহ করা চলে।

অপদ্রব্য ছাড়া, ক্রিস্টাল ল্যাটিসে গাঠনিক খুঁত ফাঁদ ও আধান বাহকের অপচয় ঘটাতে পারে। এসব ত্রুটি বিচ্যুতির মধ্যে অন্তর্ভুক্ত রয়েছে বিন্দুবত খুঁত (point-defects) যেমন, ফাঁকা স্থান (vacancies) বা ফাটল যা গ্রাহক বা দাতারূপে আচরণ করে। পীড়নে সৃষ্ট রৈখিক খুঁত বা স্থান-চ্যুতির (dislocations) কারণেও বাহকের অপচয় ঘটে।

১.৩ অর্ধপরিবাহী পদার্থে আয়নায়ন বিকিরণের ক্রিয়া

১.৩.১ আয়নায়ন শক্তি (The ionization energy) : যখন কোনো তড়িৎ আধানযুক্ত কণিকা অর্ধপরিবাহীর (চিত্র ১.১) ভিতর দিয়ে অতিক্রম করে যায় তখন সর্বসমেত প্রভাব হচ্ছে কণিকাটির ট্র্যাক বরাবরে অনেক ইলেকট্রন-হোল জোড়া উৎপাদন করা। এ উৎপাদন প্রক্রিয়াটি প্রত্যক্ষ বা পরোক্ষ উভয় ধরনেরই হতে পারে। তবে কণিকাটি উচ্চ শক্তির ইলেকট্রন (বা ডেলটা রশ্মি) উৎপন্ন করে যারা পরবর্তীতে আরো বহু সংখ্যক ইলেকট্রন-হোল জোড়া তৈরি করে থাকে। তবে বাহক উৎপাদন কলা-কৌশল যাই হোক না কেন, সন্ধায়ীতে প্রয়োগের জন্য যা প্রয়োজন তা হচ্ছে প্রাথমিক কণিকাটিকে এক জোড়া ইলেকট্রন-হোল উৎপাদনে কতটুকু শক্তি ব্যয় করতে হয়; ব্যয়িত এ শক্তিটুকুকে আয়নিক শক্তি (ionizing energy) বলে এবং এর প্রতীক সচরাচর 'ϵ'। পরীক্ষণে দেখা গেছে এটি আপতিত বিকিরণ বা তার শক্তির উপর নির্ভরশীল নয়। এ সরলীকরণের ফলে আপতিত বিকিরণটি সন্ধায়ী মাধ্যমে পুরোপুরি থেমে থাকলে এবং পুরো শক্তি জমা করে থাকলে উৎপাদিত মোট হোল-ইলেকট্রন জোড়ার সংখ্যা হিসাব করে জেনে নেয়া যায়।

অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর প্রধান সুবিধাটি এই যে এতে আয়নায়ন শক্তি লাগে খুবই নগণ্য। যেমন, জার্মানিয়াম ও সিলিকনের জন্য লাগে প্রায় 3 eV (সারণি ১.১) যেখানে গ্যাসের ক্ষেত্রে দরকার হয় প্রায় 30 eV এর মত যা অর্ধপরিবাহীর জন্য

প্রয়োজনীয় শক্তির চেয়ে প্রায় 10 গুণ বেশি। বর্ধিত সংখ্যক আধান বাহকের অর্জিত শক্তি পৃথককরণের উপর দুটি উপকারী প্রভাব রয়েছে, যথা : স্পন্দ প্রতি বাহকের সংখ্যার পরিসংখ্যানিক উঠানামা মোট বাহক সংখ্যা বৃদ্ধি পেলে নগণ্য ভগ্নাংশে দাঁড়ায়। মধ্যম ও উচ্চ শক্তির বিকিরণের ক্ষেত্রে পরিসংখ্যানিক উঠানামাই শক্তি পৃথককরণের সীমা নিরূপণে মুখ্য ভূমিকা পালন করে। নিম্ন শক্তির ক্ষেত্রে পূর্ব-পরিবর্ধকের (preamplifier) ইলেকট্রনিক নয়েজ শক্তি পৃথককরণে সীমাবদ্ধতা আনয়ন করে।

অধিকতর বিস্তৃত পরীক্ষণে দেখা গেছে যে 'C' আপতিত বিকিরণের বৈশিষ্ট্যের উপর নির্ভর করে এবং আয়নায়ন শক্তির পরিমাণ তাপমাত্রার উপর নির্ভরশীল। তাই প্রায় সব গুরুত্বপূর্ণ সন্ধায়ীর ক্ষেত্রেই তাপমাত্রা বৃদ্ধির সাথে এর মান হ্রাস পায়।

১.৩.২ ফানো ফ্যাক্টর (The Fano factor) : গড় সংখ্যা ছাড়া আধান বাহকের সংখ্যার উঠানামা বা পরিবর্তিতা (variance) প্রাথমিকভাবে গুরুত্ববহ কেননা এ প্যারামিটারটিও সন্ধায়ীর শক্তি পৃথককরণে ঘনিষ্ঠভাবে জড়িত। পর্যবেক্ষিত পরিসংখ্যানিক উঠানামা অর্ধপরিবাহীতে প্রত্যাশিত পরিমাণের চেয়ে স্বল্পতর হবে যদি আধান বাহকের গঠন পয়সন প্রক্রিয়া অনুযায়ী হয়। আয়নায়নকারী কণিকার ট্র্যাকের সংঘটনগুলি স্বাধীন হলে পয়সন মডেল কার্যকর হবে এবং পূর্বাভাস দিবে যে ইলেকট্রন-হোল জোড়ার সর্বমোট সংখ্যার পরিবর্তিতা উৎপাদিত সর্বমোট সংখ্যার সমান হবে বা E/ϵ হবে। পর্যবেক্ষণে প্রাপ্ত পরিবর্তিতাকে পয়সনের পরিবর্তিতার সাথে খাপ খাওয়ানোর জন্যই ফানো ফ্যাক্টর 'F' এর প্রচলন করা হয়েছে :

$$F = \frac{\text{পর্যবেক্ষিত পরিসংখ্যানিক পরিবর্তিতা}}{E/\epsilon} \qquad (১.৭)$$

উত্তম শক্তি পৃথককরণের জন্য ফানো ফ্যাক্টর যতোটা সম্ভব ছোট হওয়া প্রয়োজন। এর গাণিতিক মান Si ও Ge এর জন্য ১.১ সারণিতে দেয়া হয়েছে।

বিভিন্ন পরীক্ষণলব্ধ ফলাফলে পরিবর্তন দেখা যায় বিশেষ করে সিলিকনের ক্ষেত্রে। সচরাচর ফানো ফ্যাক্টর পরিমাপনের জন্য ডিটেক্টরের শক্তি পৃথককরণ এমন অবস্থায় পর্যবেক্ষণ করা হয় যাতে অন্যান্য ফ্যাক্টর যা পূর্ণশক্তির স্পন্দ শৃঙ্গকে প্রশস্ত করতে পারে তাদের পূর্বেই অপসারণ করা হয়েছে।

১.৪ অর্ধপরিবাহী বিকিরণ সন্ধায়ী (Semiconductors as radiation detectors)

১.৪.১ বৈদ্যুতিক সংযোগ (electrical contact) **ব্যবস্থা** : যে কোনো ব্যবহারিক অর্ধপরিবাহী বিকিরণ সন্ধায়ী গঠন করতে হলে অর্ধপরিবাহী পদার্থটির এক সীমান্তে বিকিরণ কর্তৃক উৎপাদিত বৈদ্যুতিক আধান সংগ্রহের ব্যবস্থা করতে

হবে। ওহমিক সংযোগ (Ohmic contact) একটি ননরেকটিফাইং (nonrectifying) তড়িৎদ্বার (electrode) যার ভিতর দিয়ে তড়িৎ আধান মুক্তভাবে প্রবাহিত হতে পারে। একটি অর্ধপরিবাহী ফলকের (slab) বিপরীত মুখে দুটি ওহমিক সংযোগ প্রস্তুত করে সন্ধায়ীর বৈদ্যুতিক বর্তনীতে সংযোগ করলে অর্ধপরিবাহীটিতে ভারসাম্যাবস্থায় আধান বাহক ঘনত্ব (concentration) বজায় থাকবে। কোনো এক তড়িৎদ্বারে একটি হোল বা ইলেকট্রন সংগৃহীত হলে অর্ধপরিবাহীটিতে ভারসাম্যাবস্থার গাঢ়ত্ব বজায় রাখার জন্য একই ধরনের বাহক বিপরীত তড়িৎদ্বার দিয়ে ঢুকিয়ে দেয়া হবে।

ওহমিক সংযোগ ব্যবহারে পর্যবেক্ষিত স্থিতাবস্থায় লীকজনিত (leakage) বিদ্যুৎ প্রবাহ এত উচ্চ হয় যে প্রাপ্ত উচ্চতম রোধকত্বের পদার্থ ব্যবহারেও সাধারণ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী হিসেবে প্রয়োগ করা চলে না। তদ্‌পরিবর্তে ননইনজেকটিং (noninjecting) বা ব্লকিং (blocking) তড়িৎদ্বারের ব্যাপক ব্যবহার রয়েছে অর্ধপরিবাহীর বিপুল আয়তন জুড়ে বিদ্যুৎ প্রবাহ হ্রাস করার জন্য। ব্লকিং তড়িৎদ্বার ব্যবহারে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র প্রয়োগে আদিতে অপসারিত আধান বাহক বিপরীত তড়িৎদ্বার থেকে পুনঃস্থাপিত হয় না এবং বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র প্রয়োগে অর্ধপরিবাহীতে তাদের সর্বাধিক ঘনত্ব হ্রাস পাবে। এভাবে লীকজনিত বিদ্যুৎ প্রবাহ এমন পর্যাপ্ত পরিমাণে হ্রাস করা যায় যে আয়নায়ন বিকিরণের ট্র্যাকে (track) উৎপাদিত ইলেকট্রন-হোল জোড়াসমূহের দ্বারা সৃষ্ট সংযোজিত (added) তড়িৎ স্পন্দ সহজেই সন্ধান (detect) করা যায়।

সর্বাধিক যথাযথ প্রতিরোধ-সংযোগস্থল হচ্ছে কোনো p-n অর্ধপরিবাহী জংশনের (junction) দু'পাশ। অত্র জংশনের 'p' পাশ দিয়ে ইলেকট্রন ঢুকানো খুবই কঠিন কেননা হোল হচ্ছে এখানে সংখ্যাগরিষ্ঠ বাহক এবং মুক্ত ইলেকট্রন আপেক্ষিকভাবে বিরল। তদ্রূপ বিপরীত পাশে ইলেকট্রন সংখ্যা গরিষ্ঠ বাহক এবং হোল অনায়াসে ঢুকানো যায় না। এ অধ্যায়ে p-type ও n-type বস্তু সরাসরি সংস্পর্শে রেখে p-n জংশন গঠনে উদ্ভূত সন্ধায়ী বিষয়ে আলোচনা করা হলো।

১.৪.২ লীকজনিত বিদ্যুৎ প্রবাহ (Leakage current) : অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী থেকে বেশ দক্ষতায় আধান বাহক সংগ্রহার্থে পর্যাপ্ত উচ্চ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সৃষ্টির জন্য সন্ধায়ীটির সক্রিয় এলাকার ভিতর দিয়ে বেশ কয়েক শত বা কয়েক হাজার প্রযুক্ত বিভব বৈশিষ্ট্যগতভাবে (typically) চাপিয়ে দিতে হবে। এমন কি আয়নায়ন বিকিরণের অনুপস্থিতিতেও সব সন্ধায়ীই সীমিত পরিবাহিতা প্রদর্শন করে ; ফলে সুস্থিত অবস্থায়ও কিছু পরিমাণ লীক-বিদ্যুৎ (leakage current) প্রবাহ পরিলক্ষিত হয়। লীক বিদ্যুতে সংঘটিত অনিবার্য এলোমেলো উঠানামা (random fluctuations) বিকিরণপাতজনিত ক্ষণিকের তরে প্রবাহিত স্বল্প সংকেত

বিদ্যুৎ প্রবাহকে (small signal current) আড়াল করে দিতে পারে এবং বহু ক্ষেত্রে গুরুত্বপূর্ণ নয়েজ (noise) উৎসেরও প্রতিনিধিত্ব করে। তাই অর্ধপরিবাহী সন্ধানী প্রণয়ন, উদ্ভাবন ও নির্মাণে (fabrication) লীক বিদ্যুৎ হ্রাসের জন্য যথাযথ পদ্ধতি গ্রহণ অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ। উদাহরণের সাহায্যে বিষয়টি বিশদ ব্যাখ্যা করা যাক।

বর্তমানে প্রাপ্ত সর্বোচ্চ বিশুদ্ধ সিলিকনের রোধকত্ব প্রায় 50,000 ওহম-সেন্টিমিটার। সিলিকনের ১ বর্গসেন্টিমিটার পৃষ্ঠ-এলাকাবিশিষ্ট ওহমিক সংযোগ-বিশিষ্ট ১ মি.মি. পুরু ফলকের মুখদ্বয়ের (faces) মধ্যে বৈদ্যুতিক রোধ (electrical resistance) হবে 5,000 ওহম। 500 ভোল্ট প্রযুক্ত বিভবে উক্ত সিলিকনে লীক-বিদ্যুৎ প্রবাহ হবে 0.1 অ্যাম্পিয়ার (ampere, A) অথচ বিকিরণপাতে সৃষ্ট 10^5 সংখ্যক আধান বাহকের জন্য সর্বোচ্চ (peak) বিদ্যুৎ প্রবাহ মাত্র 10^{-6} অ্যাম্পিয়ারের মত। তাই প্রতিরোধ-সংযোগের (blocking contact) মাধ্যমে এ বিপুল লীক-বিদ্যুৎ প্রবাহের বিরাট হ্রাস সাধন অত্যাবশ্যকীয়। শক্তি পৃথককরণে গুরুত্বপূর্ণ অবনয়ন (degradation) পরিহার করার জন্য ক্রান্তিগত (critical) প্রয়োগে লীক-বিদ্যুৎ প্রবাহ 10^{-9} অ্যাম্পিয়ার ছাড়িয়ে যেতে দেয়া যাবে না। অর্ধপরিবাহী সন্ধানী নির্মাণে পৃষ্ঠ (surface) দূষণ (contamination) পরিহারে যার পর নাই সাবধানতা অবলম্বন করা হয় লীকের পথ বন্ধ করার জন্য।

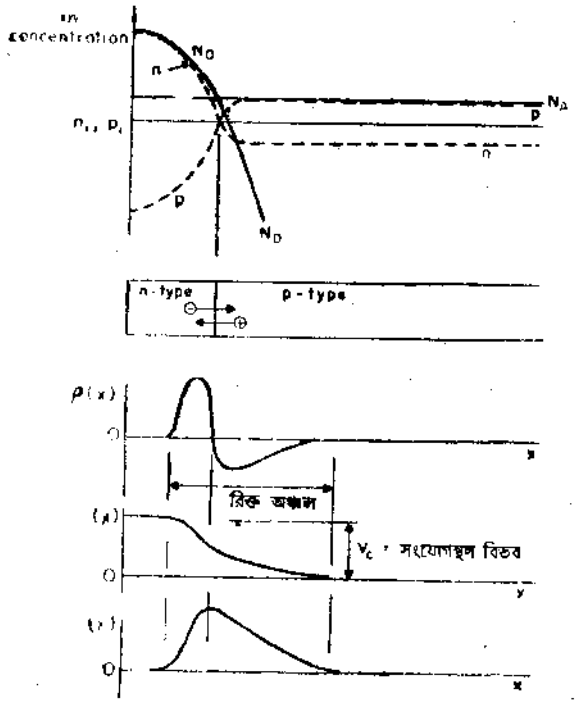
১.৪.৩ অর্ধপরিবাহী জংশন (The semiconductor junction)

১.৪.৩.১ জংশনের প্রাথমিক ধর্মাবলী (Basic properties of junction): n-type ও p-type অর্ধপরিবাহী পদার্থের জংশনের ধারে কাছে বিকিরণ সন্ধানের উপযোগী ধর্মাবলী সৃষ্টি হয়ে থাকে বলে এদের উপর ভিত্তি করে অর্ধপরিবাহী জংশন সন্ধানী উদ্ভাবন সম্ভব হয়েছে। উত্তম তাপগতীয় সংযোগে একত্রে আনলে জংশন এলাকা থেকে আধান বাহক জংশনের ভিতর দিয়ে অভিপ্রয়াণ করতে পারে। n-type ও p-type বস্তু খণ্ডদ্বয়কে একত্রে চেপে ধরলেই যথেষ্ট হয় না কেননা তাদের মধ্যবর্তী গ্যাপটি আন্তঃআণবিক ল্যাটিস স্পেসিংয়ের (spacing) চেয়ে বড় হয়ে থাকে। ব্যবহারিক ক্ষেত্রে জংশনের এক পাশের অপদ্রব্যের পরিমাণ থেকে অন্য পাশের অপদ্রব্যের পরিমাণে পরিবর্তন ঘটিয়ে একই (single) কৃস্টালে সচরাচর জংশন গঠন করা হয়। উদাহরণস্বরূপ ধরা যাক যে সুষম ঘনত্বের গ্রাহক অপদ্রব্যে ডোপিত একটি p-type কৃস্টাল দিয়েই প্রক্রিয়াটি শুরু করা হলো।

১.৬ চিত্রের শিরোদেশে বাহক গাঢ়ত্বের প্রোফাইলে (profile) আদি গ্রাহক গাঢ়ত্ব N_A অনুভূমিক (horizontal) রেখায় দেখানো হলো। এখন কৃস্টালের বাম পাশের পৃষ্ঠদেশ (surface) কৃস্টালে কিছু দূর পর্যন্ত ব্যাপ্ত হয় এমন n-type

অপদ্রব্যের বাষ্পের সম্পাতগ্রস্ত হয়েছে ধরা যাক। উক্ত দাতা অপদ্রব্যের প্রোফাইল চিত্রটিতে N_D দ্বারা চিহ্নিত করা হলো, এটি কৃস্টালের পৃষ্ঠদেশ থেকে দূরত্বের ফাংশনরূপে হ্রাস পেতে থাকে। পৃষ্ঠের কাছে দাতা অপদ্রব্যের সংখ্যা গ্রাহকের সংখ্যাকে ছাড়িয়ে যেতে পারে যেন কৃস্টালের বাম অংশটি n-type বস্তুতে রূপান্তরিত হয়ে যায়।

সাম্যাবস্থার আধান বাহকসমূহের সন্নিকৃষ্ট (approximate) পরিবর্তনও ১.৬ চিত্রের শিরোভাগে p (হোল গাঢ়ত্ব) এবং n (পরিবাহী ইলেকট্রন গাঢ়ত্ব)



চিত্র ১.৬ : জংশনের ভিতর দিয়ে বাহক ব্যাপনের (diffusion) ফলে স্থান আধান $\rho(x)$, বৈদ্যুতিক বিভব $\phi(x)$ এবং বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র $E(x)$ এর উপর আবিষ্ট প্রভাবের রেখাচিত্র।

চিহ্নিত করে দেখানো হয়েছে। পরবর্তীতে p-n জংশনের পার্শ্ববর্তী এলাকায় আধান বাহকসমূহের ব্যাপ্তির কারণে এ সমুদয় রেখাচিত্র পরিবর্তিত হয়েছে। বামের n-type অঞ্চলে পরিবাহী ইলেকট্রনের ঘনত্ব p-type অঞ্চলের তুলনায় অনেক

বেশি। দুটি অঞ্চলের মধ্যবর্তী জংশনটি পরিবহণ ইলেকট্রন ঘনত্বে বিচ্ছিন্নতার প্রতিনিধিত্ব করে। অভিপ্রয়াণের জন্য মুক্ত আধান বাহকের ঘনত্বের এমন খাড়া ঢাল যেখানেই থাক না কেন উচ্চ ঘনত্বের অঞ্চল থেকে নিম্ন ঘনত্বের অঞ্চলে নিট (net) ব্যাপন ঘটবে।

সুতরাং পরিবাহী ইলেকট্রনের p-type বস্তুতে নিট ব্যাপন ঘটবে যেখানে এগুলি অতি দ্রুত হোল এর সাথে পুনর্মিলিত হবে। কার্যত এ বিনাশ (annihilation) p-type বস্তুর সহযোজী অণুবন্ধে বিদ্যমান ফাঁকা স্থানের কোনো একটিতে পরিবাহী ইলেকট্রনের গ্রাস এর প্রতিনিধিত্ব করে। পরিবাহী ইলেকট্রনের n-type পদার্থের বাইরে ব্যাপনের ফলে আয়নিত দাতা অপদ্রব্যরূপে একটি অনড় ধন-তড়িৎ আধানকে পিছনে ফেলে যাওয়া হয়। ঠিক একই রকম যুক্তির সাহায্যে উপসংহার টানা যায় যে হোল (সংখ্যাগরিষ্ঠ বাহক p-type বস্তুতে) অবশ্যই জংশনের ভিতর দিয়ে ব্যাপিত হবে যদি ঘনত্বের আকস্মিক ঢাল পায়। জংশনের p-পাশ থেকে অপসারিত প্রতিটি হোল পিছনে একটি গ্রাহক অবস্থান রেখে যায় যা একটি বাড়তি ইলেকট্রন কুড়িয়ে নেয়। সুতরাং এটি একটি অনড় ও আবদ্ধ ঋণ-তড়িৎ আধানের প্রতিনিধিত্ব করে। সম্মিলিত প্রভাবটি হচ্ছে জংশনের p-পাশে নিট ঋণ স্থান-আধান এবং n-পাশে ধন স্থান-আধান গড়ে তোলা।

পুঞ্জীভূত স্থান-আধান একটি বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সৃষ্টি করে যা আরো অধিক ব্যাপনের প্রবণতা হ্রাস করে দেয়। ভারসাম্যাবস্থায় জংশন দিয়ে অতিরিক্ত নিট ব্যাপন নিবারণের জন্য বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রটি যথাযথ হয়ে থাকে এবং স্থিতাবস্থার আধান বিতরণ প্রতিষ্ঠিত হয়।

যে অঞ্চলে আধানের ভারসাম্যহীনতা বিরাজ করে তাকে রিক্ত অঞ্চল বলা হয়; রিক্ত অঞ্চল জংশনের উভয় পাশে p ও n অঞ্চলে বিস্তৃত থাকে। দাতার গাঢ়ত্ব n পাশে এবং গ্রাহকের গাঢ়ত্ব p পাশে সমান হলে হোল ও ইলেকট্রন উভয়ের ক্ষেত্রেই ব্যাপন অবস্থা একই হয় এবং রিক্ত অঞ্চল উভয় পাশে সমদূরত্বে বিস্তৃত হয়। সচরাচর ডোপিং লেভেলে জংশনের এক পাশে অন্য পাশের তুলনায় উল্লেখযোগ্য পার্থক্য থাকে। উদাহরণস্বরূপ বলা যায় যে দাতার গাঢ়ত্ব n-type বস্তুতে p-type বস্তুর গ্রাহকের গাঢ়ত্বের চেয়ে উচ্চতর হলে জংশন দিয়ে ব্যাপনে নিয়োজিত ইলেকট্রনসমূহ সব কয়টি হোল এর সাথে পুনর্মিলিত হওয়ার আগে p-type বস্তুতে অধিকতর দূরত্বে যেতে উদ্যোগী হবে। এক্ষেত্রে p-পাশে রিক্ত এলাকা অধিক দূর পর্যন্ত বিস্তৃত হবে। জংশন অঞ্চলে নিট আধানের সঞ্চয়ন জংশনের ভিতরে বৈদ্যুতিক বিভবান্তর (potential difference) প্রতিষ্ঠা করে। যে কোনো বিন্দুতে বিভবের মান φ পয়সন সমীকরণ সমাধান করে পাওয়া যায়:

$$\nabla^2\varphi = -\rho/\epsilon \qquad (১.৮)$$

যেখানে 'ϵ' হচ্ছে মাধ্যমটির ডাই-ইলেকট্রিক ধ্রুবক, এবং

$\rho \rightarrow$ নীট আধান ঘনত্ব।

একমাত্রার জন্য সমীকরণ (১.৮) দাঁড়ায় :

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon} \qquad (১.৯)$$

জংশনের এপার-ওপার (across) বিভবের আকার আধান বিতরণের চিত্ররেখাকে ($\rho(x)$) দু'বার সমাকলনের (integration) মাধ্যমে পাওয়া যেতে পারে। লৈখিক (graphical) উদাহরণ ১.৬ চিত্রে দেখানো হয়েছে। সাম্যাবস্থায় জংশনের এপার-ওপার বিভবান্তর (সংস্পর্শ বিভব নামে অভিহিত) অর্ধপরিবাহী পদার্থের প্রায় সম্পূর্ণ ব্যান্ড গ্যাপ মানের সমান হয়ে থাকে। এ বিভবান্তরের দিক এমন যে এটি ইলেকট্রনের বাম পাশ থেকে ডান পাশে এবং হোল এর ডান পাশ থেকে বাম পাশে আরো অধিকতর ব্যাপনের বিরোধিতা করে (চিত্র ১.৬)।

যেখানে বৈদ্যুতিক বিভবান্তর বিরাজ করে সেখানে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রও (E) বিরাজ করে। বিভবের ঢাল (gradient) এর মান (magnitude) জানা যায় সমীকরণ,

$$E = -\text{grad}\,\phi \qquad (১.১০)$$

থেকে যা এক মাত্রায় (dimension) সহজভাবে,

$$E(x) = -\frac{d\phi}{dx} \qquad (১.১১)$$

সমগ্র রিক্ত অঞ্চলের বিস্তৃতি জুড়ে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র প্রসারিত থাকবে। এর পরিবর্তনশীলতা ১.৬ চিত্রে দেখানো হয়েছে।

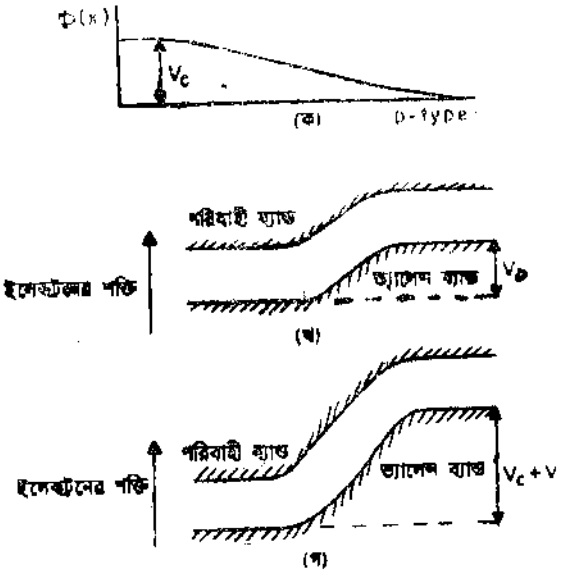
আধান বাহক রিক্ত অঞ্চলটি (depletion region) বিকিরণ সন্ধানের জন্য কতিপয় অত্যন্ত আকর্ষণীয় ধর্মাবলী (properties) প্রদর্শন করে। যে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র বিদ্যমান থাকে তা জংশনে বা তদ্‌সন্নিকটে সৃষ্ট ইলেকট্রনকে n-type বস্তুর দিকে নিয়ে যায় এবং হোলসমূহকে তদ্রূপ p-type এর দিকে ঠেলে দেয়া হয়। এরূপে অঞ্চলটি রিক্ত হয়ে পড়ে কেননা এভাবে ইলেকট্রন ও হোল এর গাঢ়ত্ব বিপুলভাবে দমন করা হয়ে থাকে। রিক্ত অঞ্চলে পড়ে থাকে শুধু অনড় অথচ আয়নিত দাতা অবস্থানস্থল এবং পূর্ণ গ্রাহক অবস্থানস্থল ; যেহেতু এ সব তড়িৎ আধান পরিবাহিতায় কোনোই অবদান রাখে না তাই জংশনের উভয় পাশে বিদ্যমান n-type ও p-type বস্তুসহ এটি অত্যন্ত উচ্চ রোধকত্ব প্রদর্শন করে। বিকিরণের যাতায়াতকালে রিক্ত অঞ্চলে সৃষ্ট ইলেকট্রন-হোল জোড়াসমূহকে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র রিক্ত অঞ্চল থেকে ঠেলে নিয়ে যায় এবং তাদের গতির ফলে মৌলিক বৈদ্যুতিক সংকেত গঠিত হয়।

১.৪.৩.২ **বিমুখী ঝোঁক স্থাপন** (Reverse biasing) : এ যাবৎ এমন অর্ধ-পরিবাহী ডায়োড জংশন নিয়ে আলোচনা করা হয়েছে যাতে কোনো বাহ্যিক বিভব প্রযুক্ত হয় নি। এরূপ বিভব নিরপেক্ষ জংশন সন্ধায়ীরূপে কাজ করলেও কার্য সম্পাদনা অনেক নিম্ন মানের হয়। এক ভোল্টের যে সংযোগ বিভব স্বতঃস্ফূর্তভাবে জংশনের এপার-ওপার (across) গঠিত হয় তা আধান বাহকসমূহের দ্রুত চলাচলের মত পর্যাপ্ত বড় বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র উৎপাদন করতে পারে না। সুতরাং ফাঁদের সাথে পুনর্মিলনে বৈদ্যুতিক আধান অবলীলাক্রমে হারিয়ে যায়। ফলে আধান সংগ্রহ অসম্পূর্ণ থাকে। রিক্ত অঞ্চলের পুরুত্ব অত্যন্ত স্বল্প হয় এবং বিভব নিরপেক্ষ জংশনের আধান ধারকত্ব হয় উচ্চ। সুতরাং পূর্বপরিবর্ধকের অন্তর্গামী ধাপের সাথে সংযুক্ত বিভব নিরপেক্ষ জংশনের নয়েজ (noise) ধর্মাবলী অত্যন্ত স্বল্প হয়ে থাকে। এ কারণে বিভব নিরপেক্ষ জংশনকে ব্যবহারিক বিকিরণ সন্ধায়ীরূপে ব্যবহার করা হয় না বরং বিমুখী ঝোঁকগ্রস্ত করার জন্য একটি বাহ্যিক বিভব প্রয়োগ করা হয়।

ডায়োড সন্ধায়ী হিসেবে p-n জংশন অত্যন্ত সুপরিচিত। এর ধর্মাবলী এমনই যে সম্মুখ (forward) দিকে বিভব প্রয়োগ করলে এটি অবলীলাক্রমে বিদ্যুৎ পরিবহণ করে কিন্তু বিমুখীভাবে বিভব প্রয়োগ করলে এটি অতি নগণ্য পরিমাণ বিদ্যুৎ পরিবহণ করে। ১.৬ চিত্রের অবস্থান-অবস্থায় ধরা যাক যে জংশনের p-পাশে n-পাশের তুলনায় ধন-বিভব প্রয়োগ করা হয়েছে। বিভবটি n-পাশ থেকে পরিবাহী ইলেকট্রন এবং p-পাশ থেকে হোল জংশনের ভিতর দিয়ে আকর্ষণ করবে। যেহেতু উভয় ক্ষেত্রে এগুলোই গরিষ্ঠ আধান বাহক তাই জংশনের মধ্যে দিয়ে পরিবাহিতা বিপুলভাবে বেড়ে যায়। ১.৬ চিত্রে প্রদর্শিত সংযোগ বিভব (contact potential) প্রযুক্ত ঝোঁক (bias) বিভবের পরিমাণের সমান হ্রাস পায়; এটি ইলেকট্রনকে জংশনের এক পাশ থেকে অন্য পাশের বিভবকে স্বল্পতর দেখার প্রবণতা দেয়। এটিই সম্মুখ ঝোঁকের (forward biasing) দিক। সম্মুখীন ঝোঁক বিভবের অতি অল্প পরিমাণই দরকার হয় জংশনকে বিপুল বিদ্যুৎ পরিবাহী করার জন্য।

পরিস্থিতিকে প্রত্যাবৃত্ত (reversed) করলে এবং জংশনের p-পাশকে n-পাশের তুলনায় ঋণাত্মক করলে জংশনটি বিমুখী ঝোঁকগ্রস্ত (reverse biased) হয়। এমতাবস্থায় জংশনের এক পাশ থেকে অন্য পাশের স্বাভাবিক বিভবান্তর বৃদ্ধি পেয়ে থাকে (চিত্র ১.৭-গ)। অতঃপর সংখ্যালঘিষ্ঠ বাহকসমূহের (minority carriers) (n-পাশের হোল এবং p-পাশের ইলেকট্রন) জংশনের ভিতর দিয়ে আকর্ষণ করা হয়; যেহেতু এদের গাঢ়ত্ব অপেক্ষাকৃত স্বল্প তাই জংশনের এপার-ওপার ডায়োডের ভিতর দিয়ে বিমুখী (reverse) বিদ্যুৎ প্রবাহ নগণ্য হয়ে থাকে।

সুতরাং p-n জংশন একটি রেকটিফায়ার (rectifier) হিসেবে কাজ করে ; এটি একদিকে বিদ্যুৎ প্রবাহকে তুলনামূলকভাবে অবাধে যেতে দেয় এবং উল্টাদিকে যাওয়ার পথে বিপুল রোধকের মাধ্যমে বাধা দেয়। বিমুখী ঝোঁক প্রবল হলে ডায়োডটি আকস্মিকভাবে ভেঙে পড়ে, বিমুখী বিদ্যুৎ প্রবাহ দ্রুত বেড়ে যায়; ফলে ধ্বংসাত্মক প্রভাব পড়ে।



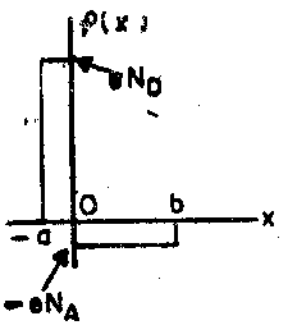
চিত্র ১.৭ : (ক) ১১.৬ চিত্রে প্রদর্শিত n-p জংশনের এপার-ওপার (across) বিভবের পরিবর্তন। (খ) জংশনের এপারে-ওপারে ইলেকট্রনের শক্তিতে উদ্ভূত পরিবর্তন। (গ) জংশনের এপারে-ওপারে বিমুখী ঝোঁক (reverse bias) প্রয়োগের দরুন ব্যাণ্ডে সংযুক্ত অতিরিক্ত সরণ (displacement)।

১.৪.৩.৩ বিমুখী ঝোঁকগ্রস্ত জংশনের ধর্মাবলী (Properties of reverse biased junction) : জংশনে বিমুখী ঝোঁক (reverse bias) প্রয়োগ করলে প্রযুক্ত সম্পূর্ণ বিভবটি রিক্ত অঞ্চলে আবির্ভূত হবে, কেননা এ অঞ্চলের রোধকত্ব স্বাভাবিক n-type ও p-type বস্তুর চেয়ে বহুগুণে বেশি। যেহেতু বিমুখী ঝোঁকের প্রভাব হচ্ছে জংশনের এপার-ওপার (across) দিয়ে বিভব পার্থক্যকে গুরুত্ববহ করে তোলা তাই পয়সন সমীকরণ (১.৮) এর চাহিদা হচ্ছে যে স্থান আধানও অবশ্যই বৃদ্ধি পাবে এবং জংশনের উভয় পাশে আরো অধিকতর দূরত্বে বিস্তৃত হবে। এরূপে রিক্ত অঞ্চলের পুরুত্বও বাড়ে ; ফলে বিকিরণ কর্তৃক সৃষ্ট আধান

বাহক সংগ্রহের অঞ্চলের আয়তন বিস্তৃত হয়। ব্যবহারিক সন্ধায়ী সব সময়ই প্রযুক্ত এমন বিভব দ্বারা চালনা করা হয় যেন সংযোগ বিভবের তুলনায় এটি বিশাল বড় হয় এবং জংশনের এপার-ওপারে বিদ্যমান বিভবান্তরের পরিমাণের উপরে পূর্ণ প্রাধান্য স্থাপন করতে পারে।

১.৬ চিত্রে প্রদর্শিত আধান বণ্টনকে নিম্নে প্রদত্ত আদর্শ বণ্টন দ্বারা প্রতিনিধিত্ব করানো হলে বিমুখী ঝোঁকগ্রস্ত জংশনের বেশ কতিপয় ধর্মের বৈশিষ্ট্য অনুমান করা যায়। যথা :

$$\rho(x) = \begin{cases} eN_D & (-a < x \leqslant 0) \\ -eN_A & (0 < x \leqslant b) \end{cases}$$



চিত্র : ১.৮

এখানে ধরা হয়েছে যে ইলেকট্রন ব্যাপনের ফলে সুষম ধন স্থান-আধানের (আয়নিত দাতা অবস্থান) জংশনের n-পাশে $-a < x \leqslant 0$ দ্বারা সীমিত অঞ্চলে বিস্তার ঘটে। এ সদৃশ ঋণ স্থান-আধান (ভরতি গ্রাহক অবস্থান) p-পাশে $0 < x \leqslant b$ দ্বারা সীমিত অঞ্চলে বিস্তার লাভ করে হোল ব্যাপনের ফলে। যেহেতু নিট আধান শূন্য হতে হবে, তাই $N_D a = N_A b$। সমীকরণ (১.৯)-কে এ ক্ষেত্রে প্রয়োগ করলে দাঁড়ায় :

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \begin{cases} -eN_D/\epsilon & (-a < x \leqslant 0) \\ +eN_A/\epsilon & (0 < x \leqslant b) \end{cases}$$

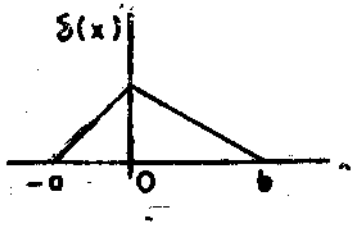
সংকলন (integration) করে এবং সীমান্ত শর্ত (boundary condition) প্রয়োগ করে পাওয়া যায় যে আধান বণ্টনের উভয় কিনারে বা ধারে (edge) বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র $E = -\frac{d\varphi}{dx}$ অবশ্যই শূন্য হবে অর্থাৎ

$$\frac{d\varphi}{dx}(-a) = 0 \quad \text{এবং} \quad \frac{d\varphi}{dx}(b) = 0 \text{ হবে।}$$

ফলাফলটি তখন দাঁড়ায় :

$$\frac{d\varphi}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\epsilon}\left(x+a\right) & (-a < x \leqslant 0) \\ +\frac{eN_A}{\epsilon}\left(x-b\right) & (0 < x \leqslant b) \end{cases}$$

তদনুরূপ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র $\delta = -(d\varphi/dx)$ এর আকার হবে নিম্নে প্রদর্শিত চিত্রের ন্যায় :



চিত্র : ১.৯

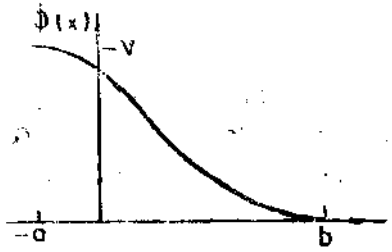
পরবর্তীতে আরেকবারের সংকলনে বৈদ্যুতিক বিভব $\varphi(x)$ এর মান পাওয়া যায়। তুলনামূলকভাবে ক্ষুদ্র সংযোগ বিভবকে উপেক্ষা করলে সংশ্লিষ্ট অংশনের n-পাশ থেকে p-পাশের বিভবান্তর ঠিক প্রযুক্ত বিমুখী ঝোঁক 'V' এর মানের সমান হয়। সুতরাং এবার সীমান্ত শর্ত প্রয়োগ করা চলে :

$$\varphi(-a) = v \quad \text{এবং} \quad \varphi(b) = 0$$

সমাধানটি তখন দাঁড়ায় :

$$\varphi(x) = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\epsilon}(x+a)^2 + v & (-a < x \leqslant 0) \\ +\frac{eN_A}{\epsilon}(x-b)^2 & (0 < x \leqslant b) \end{cases}$$

চিত্র : ১.১০



যেহেতু সংশ্লিষ্ট জংশনের উভয় পাশের সমাধানই $x = 0$ মানে অবশ্যই মানানসই (match) হতে হবে, তাই লেখা যায় :

$$V - \frac{eN_D a^2}{2\epsilon} = \frac{eN_A b^2}{2\epsilon}$$

বা $$N_A b^2 + N_D a^2 = \frac{2\epsilon V}{e}$$

এখন যেহেতু $N_D a = N_A b$, উপরিউক্ত রাশিমালাকে নিম্নলিখিতভাবে লেখা যায় :

$$(a+b)b = \frac{2\epsilon V}{eN_A}$$

আধান বাহক রিক্ত অঞ্চল (depletion region) d এর মোট প্রশস্ততা হচ্ছে ঐটুকু সম্পূর্ণ দূরত্ব যা জুড়ে স্থান-আধান প্রসারিত হয়, বা $d = a + b$ হয়।

বর্তমান উদাহরণের উদ্দেশ্যে ধরে নেয়া হয়েছে যে জংশনের n-পাশের ডোপায়ন লেভেল (doping level) p-পাশের তুলনায় এমন অনেক উচ্চতর যেন $N_D \gg N_A$। যেহেতু $N_D a = N_A b$, তাই আবশ্যিকভাবে সত্য হয় যে $b \gg a$, সুতরাং স্থান-আধান আরো অধিকতর দূরত্বে p-পাশে প্রসারিত হয় n-পাশের তুলনায়। তখন $d \simeq b$ এবং লেখা যায় :

$$d \simeq \left[\frac{2\epsilon V}{eN_A}\right]^{1/2}$$

যদি এমন বিপরীত অনুমিতি (assumption) দিয়ে শুরু করা হতো যে p-পাশের ডোপায়ন লেভেল প্রবল ছিল তাহলেও একই রকম ফলাফল পাওয়া যেত, তবে এক্ষেত্রে উপরের রাশির N_A পুনঃস্থাপিত হতো N_D দ্বারা। সুতরাং রিক্ত অঞ্চলের পুরুত্বের জন্য সাধিকীকৃত (generalized) সমাধান দাঁড়ায় :

$$d \simeq \left[\frac{2\epsilon V}{eN}\right]^{1/2} \qquad (১.১২)$$

এ রাশিতে এখন 'N' প্রতিনিধিত্ব করে ডোপ (dope) বস্তুর গাঢ়ত্ব (হয় দাতা বা গ্রাহক) জংশনের ঐ পাশে যেখানে এর লেভেল নিম্নতর (পৃষ্ঠ প্রতিবন্ধকের ক্ষেত্রে কৃস্টালের বৃহত্তর অংশ জুড়েই 'N' ডোপ বস্তুর গাঢ়ত্ব)। ডোপিত অর্ধপরিবাহীর রোধকত্ব 'ρ' হচ্ছে $1/(e\mu N)$ যেখানে 'μ' হচ্ছে সংখ্যাগরিষ্ঠ বাহকের চলিষ্ণুতা। ১.১২ সমীকরণকে তাই লেখা যায় :

$$d \simeq [\, 2\epsilon V \mu \rho \,]^{1/2} \qquad (১.১৩)$$

যেহেতু যে কেউ কোনো একটি প্রযুক্ত বিভবের জন্য বৃহত্তম সম্ভব রিক্তকরণ (depletion) চাইবে সেহেতু রোধকত্ব যতোটা সম্ভব উচ্চ হওয়াই সুবিধাজনক। ডোপায়ন প্রক্রিয়ার পূর্বে এ রোধকত্ব অর্ধপরিবাহী বস্তুর বিশুদ্ধতা দ্বারা সীমিত হয়ে থাকে কেননা অবশেষ অপদ্রব্যের অসম প্রভাবকে কাটিয়ে উঠার জন্য যথেষ্ট পরিমাণে ডোপ বস্তু অবশ্যই সংযোগ করতে হবে। সুতরাং সম্ভাব্য সর্বাপেক্ষা বিশুদ্ধ বস্তু থেকে সন্ধায়ী অর্জনের সুবিধাদি বেশ বেশি।

জংশনের উভয় পাশে পুঞ্জীভূত আবদ্ধ আধানের কারণে রিক্ত অঞ্চল আধানাহিত ধারকের (capacitor) মত আচরণ করে। বিমুখী বিভব ঝোঁক বৃদ্ধি করলে রিক্ত অঞ্চল অধিকতর পুরু হয় এবং আলাদাকৃত আধানসমূহের দ্বারা প্রতিনিধিত্বকৃত ধারকত্ব তাই হ্রাস পায়। প্রতি একক ক্ষেত্রফলে ধারকত্বের মান হয় :

$$C = \frac{\epsilon}{d} \simeq \left[\frac{e \epsilon N}{2V}\right]^{1/2} \qquad (১.১৪)$$

ইলেকট্রনিক নয়েজ প্রবল, এমন অবস্থায় উত্তম শক্তি পৃথককরণ সন্ধায়ীর স্বল্প ধারকত্ব অর্জনের উপর নির্ভর করে এবং সম্ভব সর্বোচ্চ প্রযুক্ত বিভব ব্যবহার করে অগ্রগতি সাধন করা হয়। সর্বোচ্চ মানের (maximum) বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র n-type ও p-type বস্তুর পরিবৃত্তি (transition) বিন্দুতে সংঘটিত হয়। এর মান দাঁড়ায় :

$$E_{max} \simeq \frac{2V}{d} = \left[\frac{2VNe}{\epsilon}\right]^{1/2} \qquad (১.১৫)$$

এবং বৈশিষ্ট্যগত অবস্থায় সহজেই $10^6 - 10^7$ ভোল্ট/মিটার মানে পৌঁছে। প্রমাণ (standard) জংশনের ক্ষেত্রে (আংশিক খালি) রিক্তকৃত স্তরের পুরুত্ব d বিভব মানের বর্গমূলের ($\sqrt{V}$) সমানুপাতিক হয় যেন বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের সর্বোচ্চ মান 'E_{max}' প্রযুক্ত বিভবের $\sqrt{V}$ এর সাথে বৃদ্ধি পায়।

যে কোনো ডায়োড সন্ধায়ীর ধর্মাবলীর আকস্মিক অবনতি পরিহারের জন্য চালনা বিভবের সর্বোচ্চ মান অবশ্যই অতিক্রমণ বিভবের (break down voltage) নিচে রাখতে হবে। বাণিজ্যিক উদ্দেশ্যে উৎপাদিত সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে সর্বোচ্চ চালনা বিভবের নির্দেশ থাকে ; এটি অত্যন্ত কড়াকড়িভাবে মেনে চলা প্রয়োজন। লীকেজ বিদ্যুৎ প্রবাহ পর্যানুসরণের মাধ্যমে বিভব প্রয়োগকালে বাড়তি নিরাপত্তা নিশ্চিত করা চলে।

পরিশেষে সংক্ষেপে বলা যায় যে বিমুখী বিভব ঝোঁকগ্রস্ত p-n জংশন একটি অত্যন্ত আকর্ষণীয় বিকিরণ সন্ধায়ী কেননা রিক্ত অঞ্চলে সৃষ্ট আধান বাহকের দ্রুত এবং দক্ষতার সাথে সংগ্রহ করা যায়। রিক্ত অঞ্চলের প্রশস্ততা সন্ধায়ীর সক্রিয় আয়তনের প্রতিনিধিত্ব করে এবং বিমুখী বিভব ঝোঁক পরিবর্তনের দ্বারা তা বদলানো যায়। অর্ধপরিবাহী জংশনের পরিবর্তনীয় সক্রিয় আয়তন বিকিরণ সন্ধায়ীসমূহের জন্য অনুপম এবং প্রায় সময়ই সুবিধাজনকভাবে কাজে লাগানো হয়। প্রযুক্ত বিভবের সাথে সন্ধায়ীর ধারকত্বও পরিবর্তিত হয়। তাই স্থিরভাবে চালনার জন্য আধান সুবেদী পূর্ব-পরিবর্ধক দরকার হয়।

১.৫ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর অবস্থান-অবস্থা (Semiconductor detector configuration)

১.৫.১ ব্যাপ্ত জংশন (diffused junctions) : অর্ধপরিবাহী ডায়োড সন্ধায়ী তৈরির এক অতি সাধারণ পদ্ধতি হচ্ছে p-type বস্তুর একটি সুষম কৃস্টাল দিয়ে কাজটি শুরু করা। কৃস্টালের এক পৃষ্ঠকে n-type অপদ্রব্যের (বৈশিষ্ট্যগতভাবে ফসফরাসের) বাষ্প সম্পাতে (exposure) প্রক্রিয়া (treat) করা হয় যা তখন p-type কৃস্টালের পৃষ্ঠের সন্নিকটস্থ অঞ্চলকে p-type থেকে n-type এ রূপান্তর করে। তাই পৃষ্ঠ থেকে কিছুটা দূরে যে বিন্দুতে n-type ও p-type অপদ্রব্য রয়েছে সেখানে তাদের আপেক্ষিক গাঢ়ত্ব উল্টে (reverse) দেয়। সেখানে তখন একটি জংশন গঠিত হয়। ব্যাপ্ত n-type স্তরের বৈশিষ্ট্যগত গভীরতা পরিসর হয় $0.1 - 2.0 \times 10^{-6}$ মিটার। যেহেতু n-type পৃষ্ঠস্তর আদি p-type এর তুলনায় ভারিভাবে ডোপিত থাকে তাই আধান বাহক রিক্ত অঞ্চলটি প্রাথমিকভাবে জংশনের p-পাশে প্রসারিত হয়ে থাকে। সুতরাং পৃষ্ঠস্তরের অধিকাংশই রিক্ত অঞ্চলের বাইরে থেকে যায় এবং একটি অসক্রিয় স্তরের (dead layer) বা জানালা যার ভেতর দিয়ে আপতিত বিকিরণ রিক্ত অঞ্চলে প্রবেশের পূর্বে অবশ্যই অতিক্রম করবে তার প্রতিনিধিত্ব করে। তড়িৎ আধানযুক্ত কণিকার বর্ণালীবীক্ষণে এ অসক্রিয় স্তরটির একটি বাস্তব অসুবিধা হতে পারে কেননা কণিকাটির শক্তির এক উল্লেখযোগ্য অংশের অপচয় ঘটে সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকায় পৌঁছার আগেই। এ অসক্রিয় স্তরের অসুবিধা পরিহার করার জন্য ব্যাপ্ত জংশন সন্ধায়ীর অনেক প্রয়োগের ক্ষেত্রেই পৃষ্ঠ বাঁধ (surface barrier) সন্ধায়ী দ্বারা প্রতিস্থাপন (replace) করা হয়েছে। ব্যাপ্ত জংশন সন্ধায়ী এখনও বাণিজ্যিকভাবে উৎপাদিত হয়ে চলেছে এবং পৃষ্ঠ বাঁধ সন্ধায়ীর চেয়ে কিছু বাড়তি সুবিধা দিয়ে থাকে যেমন এরা কতকটা অধিকতর এলোমেলো; ফলে তৈল বা অন্য কোনো বহিরাগত পদার্থ পৃষ্ঠে জমা হওয়ার কারণে সমস্যাসংকুল হয়ে পড়ে না; এরা বিকিরণ পাতে তেমন ক্ষতিগ্রস্তও হয় না।

১.৫.২ **পৃষ্ঠ বাঁধ** (Surface barriers) **সন্ধায়ী** (detector) : জংশন গঠনে p-type বস্তুর ভূমিকাটি n-type কৃস্টালের পৃষ্ঠে উচ্চ ঘনত্বের ইলেকট্রন ফাঁদ তৈরি দ্বারাও ধারণ করা যায়। উদ্ভূত রিক্ত অঞ্চল ইতঃপূর্বে আলোচিত ব্যাপ্ত জংশনের মতই অনেকটা আচরণ করে থাকে। পরীক্ষণলব্ধ ফলাফলে প্রাপ্ত প্রস্তুত প্রণালী ব্যবহার করেই পৃষ্ঠ অবস্থা গঠন করা হয়ে থাকে। সচরাচর প্রক্রিয়াটি হচ্ছে পৃষ্ঠকে এচিং (etching) করা এবং অতঃপর পাতলা সোনার পাতকে বৈদ্যুতিক সংযোগের জন্য বাষ্পীভবন করা। সর্বোত্তম ফলাফল পেতে হলে পৃষ্ঠে কিছু পরিমাণে অক্সিডেশন (oxidation) প্রবর্তিত হয় এমন অবস্থায় বাষ্পীভবন করতে হয়। সোনা ও সিলিকনের মধ্যে উদ্ভূত অক্সাইড স্তরটি পৃষ্ঠ বাঁধের উদ্ভূত ধর্মাবলীতে স্পষ্টতই গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা পালন করে। p-type কৃস্টাল দিয়ে শুরু করে এবং সমপর্যায়ের n-type সংযোগ গঠনের জন্য অ্যালুমিনিয়াম বাষ্পীভবন করেও পৃষ্ঠ বাঁধ সন্ধায়ী উৎপাদন করা চলে।

পৃষ্ঠ বাঁধ সন্ধায়ীর একটি ব্যবহারিক অসুবিধা হলো এদের আলোক সুবেদিত্ব। পাতলা প্রবেশ জানালাটি আলোক স্বচ্ছ বলে সন্ধায়ী পৃষ্ঠে আপতিত ফোটন সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকায় পৌঁছে যেতে পারে। দৃশ্যমান আলোক ফোটনের 2—3eV শক্তিও অধিকাংশ অর্ধপরিবাহীর ব্যান্ড গ্যাপ শক্তির চেয়ে অধিকতর। ফলে আলোক ফোটনের মিথস্ক্রিয়াতেও ইলেকট্রন-হোল জোড়া উৎপন্ন হতে পারে। স্বাভাবিক গৃহ আলোকেও উচ্চ পর্যায়ের নয়েজ উৎপন্ন হয় কিন্তু অধিকাংশ তড়িৎ আধানযুক্ত কণিকার জন্য দরকারি বায়ুশূন্য বেষ্টনীটি আলোক-আবিষ্ট নয়েজকে গুরুত্বহীন পর্যায়ে হ্রাস করে দেয়। পাতলা প্রবেশ জানালাটিও সন্ধায়ীকে জলীয় বাষ্প সম্পাতে ক্ষতির প্রতি সুবেদী করে তোলে। নিরাপত্তার জন্য সম্মুখ পৃষ্ঠটিকে কখনোই সরাসরি হ্যান্ডল (handle) করা উচিত নয়।

১.৫.৩ **আয়ন প্রোথিত সন্ধায়ী** (Ion implanted detector) : অর্ধপরিবাহীর পৃষ্ঠে ডোপায়ন অপদ্রব্য লুকানোর বিকল্প পদ্ধতিটি হচ্ছে সংশ্লিষ্ট পৃষ্ঠটিতে কোনো ত্বরক যন্ত্রে উৎপাদিত আয়ন রশ্মিপাত (exposure) ঘটানো। এ পদ্ধতি আয়ন প্রোথিতায়ন (ion implantation) প্রক্রিয়া বলে পরিচিত এবং n^+ বা p^+ স্তর গঠন করা যায় যথাক্রমে ফসফরাস বা বোরন আয়ন ত্বরমানের (accelerating) মাধ্যমে। একটি সুনির্দিষ্ট ত্বরক বিভবে (নমুনাস্বরূপ প্রায় 10 keV) সমশক্তির ও অর্ধপরিবাহীতে সুনির্দিষ্ট যাত্রা পরিসর রয়েছে এমন আয়ন উৎপন্ন হয়। আপতিত আয়নের শক্তি বদলিয়ে সংযুক্ত অপদ্রব্যের গাঢ়ত্ব প্রোফাইল সূক্ষ্মভাবে নিয়ন্ত্রণ করা চলে। আয়ন রশ্মিপাতের অব্যবহিত পরেই অ্যানিলকরণের (annealing) এক ধাপ গ্রহণের মাধ্যমে আপতিত আয়নসমূহের দ্বারা সৃষ্ট বিকিরণজনিত ক্ষতির প্রভাব হ্রাস করা হয়। আয়ন প্রোথিতায়নের একটি সুবিধা এই যে প্রয়োজনীয়

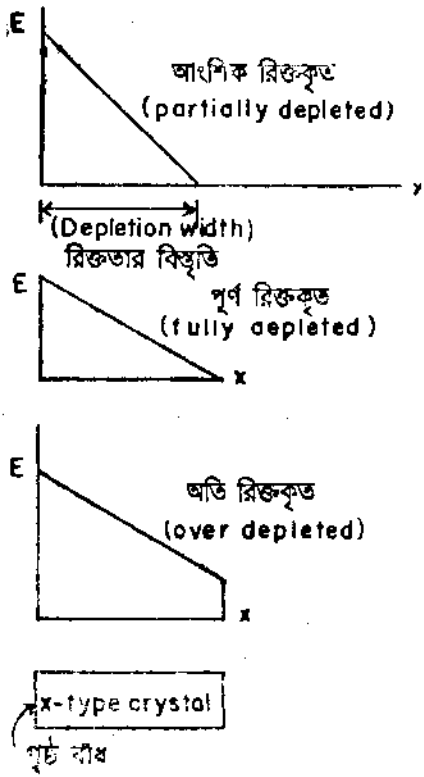
অ্যানিলকরণ তাপমাত্রা (500°C এর কম) একটি ব্যাপ্ত জংশনের জন্য ডোপ বস্তুর তাপীয় ব্যাপনে প্রয়োজনীয় তাপমাত্রার চেয়ে কম হয়। কৃস্টালটির গঠন তাই স্বল্পতর বিশৃঙ্খল (disturbed) হয় এবং বাহকের জীবন অপ্রয়োজনে হ্রাস পায় না। পৃষ্ঠ বাঁধ সন্ধায়ীর তুলনায় আয়ন প্রোথিত সন্ধায়ী অধিকতর স্থিত হওয়ার প্রতি ঝোঁকগ্রস্ত এবং পারিপার্শ্বিক অবস্থার দ্বারাও প্রভাবিত হয় না। তাছাড়া 34×10^{-9} মিটার সিলিকনসম পাতলা প্রবেশ জানালাযুক্ত আয়ন প্রোথিতায়ন সন্ধায়ী গঠন করা যায় এবং বাণিজ্যিকভাবেও আজকাল পাওয়া যায়।

১.৫.৪ সম্পূর্ণভাবে রিক্তকৃত সন্ধায়ী (Totally depleted detector) : কোনো জংশন সন্ধায়ীর বাহক রিক্ত অঞ্চলের পুরুত্ব বিমুখী ঝোঁকগ্রস্ত বিভব বৃদ্ধির সাথে সাথে বেড়ে চলে। জংশনের অতিক্রমণ বিভব (breakdown voltage) পুরুত্বের সীমা নির্ধারণ করে থাকে এবং উচ্চ রোধকত্বের সিলিকনের ক্ষেত্রে কয়েক মিলিমিটার পর্যন্ত পুরু হয়ে থাকে। কোনো n-type কৃস্টালে এ সীমিতকরণ পুরুত্বের চেয়ে স্বল্পতর পুরুত্বে পৃষ্ঠ বাঁধ সন্ধায়ী গঠিত হলে রিক্ত অঞ্চলকে কৃস্টালের সম্পূর্ণ পুরুত্ব জুড়ে প্রসারিত করা যেতে পারে।

প্রযুক্ত বিভবকে যদি আরো বৃদ্ধি করা হয় তাহলেও রিক্ত অঞ্চলটি স্পষ্ট প্রতীয়মানভাবেই আরো প্রশস্ততর হতে পারে না কিন্তু কৃস্টালস্থ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র বাড়তেই থাকবে। সংযোজিত (added) বিভব বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের সর্বত্র সুষম বৃদ্ধিতে পর্যবেসিত হয় এবং প্রোফাইলটি বিপুল বিভবের ক্ষেত্রে সারা কৃস্টাল জুড়ে ধ্রুবক হতে ঝোঁক নেয়। এ আচরণ ১.১১ চিত্রে গ্রাফের সাহায্যে বিশদ ব্যাখ্যা করা হলো। এমতাবস্থায় সন্ধায়ীকে কখনও কখনও অতি রিক্তকৃত (over depleted) সন্ধায়ী বলে এবং এ অবস্থাধীনেই সামগ্রিকভাবে রিক্তকৃত সন্ধায়ী সচরাচর ব্যবহৃত হয়। এ ধরনের পাতলা চ্যাপ্টা অর্ধপরিবাহী পদার্থ প্রেরণ (transmission) সন্ধায়ীরূপে ব্যবহৃত হয়ে থাকে ; বিশেষ করে যে সব আপতিত কণিকা সন্ধায়ীকে ভেদ করে চলে যেতে পারে তাদের জন্য এগুলি খুবই উপযোগী। তড়িৎ স্পন্দের বিস্তার তখন আপতিত কণিকাটির সন্ধায়ীর ভিতর দিয়ে অতিক্রমণকালে ব্যয়িত শক্তি নির্দেশ করে। সামগ্রিকভাবে বাহক রিক্ত $50—1000 \times 10^{-6}$ মিটার পুরুত্বের সিলিকন সন্ধায়ী বাণিজ্যিকভাবে পাওয়া যায়।

সামগ্রিকভাবে বাহক রিক্ত সন্ধায়ীর কতিপয় ধর্মাবলী প্রাথমিকভাবে গুরুত্বপূর্ণ। সন্ধায়ীর সম্মুখ ও পিছনে উভয় পৃষ্ঠে বিদ্যমান অসক্রিয় স্তর যতো সম্ভব ক্ষীণ হতে হবে; এমতাবস্থায় তড়িৎ স্পন্দের বিস্তার অতিক্রমণকালে বস্তুটির শক্তি ক্ষয় সঠিকভাবে নির্দেশ করবে। সম্মুখবর্তী পৃষ্ঠটি হচ্ছে সাধারণত জমাকৃত (deposited) সোনার পৃষ্ঠ বাঁধ যেখানে পশ্চাতের তড়িৎদ্বারটি হচ্ছে n-type কৃস্টালে

একটি ওহমিক সংযোগ (ohmic contact)। এ উভয় সংযোগেরই পুরুত্ব 100×10^{-9} মিটার সিলিকন সমপর্যায়ের চেয়ে কম হতে পারে।



চিত্র ১.১১ : পৃষ্ঠ বাঁধ সন্ধায়ীতে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের অবস্থান-অবস্থা। সব অবস্থাতেই জংশন স্থানে বা পৃষ্ঠ বাঁধে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের সর্বোচ্চ মান হয়।

সর্বনিম্ন মানের ঝোঁক বিভব যাতে এ সন্ধায়ীসমূহ সামগ্রিকভাবে বাহক রিক্ত হয় তা নিরূপণের জন্য প্রায়ই অভিজ্ঞতালব্ধ পরখ চালানো হয়ে থাকে। সমশক্তির তড়িৎ আধান কণিকা নির্গমনকারী উৎসের কণিকাসমূহের জন্য সন্ধায়ীর সম্মুখে এবং পিছনে আপতনে উৎপাদিত তড়িৎ স্পন্দ রেকর্ড করা হয়। সন্ধায়ীটি সামগ্রিকভাবে বাহক রিক্ত হলে উভয় পরিস্থিতিতেই স্পন্দ উচ্চতা একই ধরনের হওয়া উচিত। এক্ষেত্রে বিবেচনায় আনতে হবে যে উভয় পাশের জানালার সহজাত পুরুত্ব কখনোই সমান নয়।

আংশিক বাহক রিক্ত সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে সন্ধায়ীতে ব্যবহৃত কৃস্টালের সর্বত্র পুরুত্ব সমস্বত্ববিশিষ্ট হওয়া ক্রান্তিগত (critical) নয় কারণ সন্ধায়ীর সক্রিয় আয়তন সীমিত রিক্ততার গভীরতা দিয়ে নিরূপিত হয়। সামগ্রিকভাবে বাহক রিক্ত সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে অবশ্য ওয়াফারের (wafer) পুরুত্ব সর্বত্র সমস্বত্ব রাখা প্রয়োজন ; তাতে সন্ধায়ীর পৃষ্ঠ দিয়ে শক্তি অপচয়ের পরিবর্তন পরিহার করা যায়। ফলে সামগ্রিকভাবে আধান বাহক রিক্ত সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে কৃস্টাল ওয়াফার সমস্বত্ব রাখার জন্য যথেষ্ট যত্ন নেয়া হয়ে থাকে।

সামগ্রিকভাবে বাহক রিক্ত সন্ধায়ীসমূহের অন্যান্য সন্ধায়ীর অবস্থান-অবস্থানের (configurations) চেয়ে আরো বেশ কিছু সুবিধা রয়েছে। আংশিক খালি করা সন্ধায়ীতে রিক্ত অঞ্চলের কিনারা ও পিছনের তড়িৎদ্বারের মধ্যবর্তী অরিক্তকৃত (undepleted) p-অঞ্চলে কিছুটা অনুক্রমিক রোধ (series resistance) থাকবে। এ রোধের সাথে জড়িত রয়েছে জনসন (Johnson) নয়েজ (noise)—নয়েজের অন্যতম উৎস এবং শক্তি পৃথককরণ অপচয়েরও কারণ, যাকে রিক্ত অঞ্চল পশ্চাতের সংযোগ পর্যন্ত প্রসারণের মাধ্যমে অপসারণ করা যায়। বাহক খালি না করা অঞ্চলটি অপসারণের মাধ্যমে যন্ত্রটির সময়গঠিত ধর্মাবলীও সচরাচর উন্নীত করা যায়। একবার পুরোপুরি বাহক রিক্ত করে নিলে প্রযুক্ত বিভব ঝোঁকে সন্ধায়ীর ধারকত্বে (capacitance) আর কখনও পরিবর্তন ঘটে না।

১.৫.৫ ইপিটেক্সিয়াল নির্মাণ কৌশল (Epitaxial fabrication) : ইপিটেক্সিয়াল ক্রমবৃদ্ধি (growth) প্রক্রিয়ায় ভিন্ন ধর্মের অর্ধপরিবাহীর ভিত্তির (substrate) উপরে বাহ্যিক দশার অন্য এক অর্ধপরিবাহীর সুষম (uniform) ডোপিত পাতলা স্তর স্থাপন করা হয়। সুতরাং এটি অংশন গঠনের একটি বিকল্প পদ্ধতি যাতে ডোপপদার্থের ব্যাপন বা পৃষ্ঠ-বাঁধ (surface barrier) তৈরির দরকার পড়ে না। অর্ধপরিবাহী প্রযুক্তির অন্যান্য ক্ষেত্রে প্রক্রিয়াটি ব্যাপকভাবে ব্যবহৃত হয়ে থাকলেও বিকিরণ সন্ধায়ী নির্মাণে কেবল অতি সম্প্রতি মাত্র এর প্রয়োগ করা হয়েছে। এর কতিপয় সম্ভাব্য সুবিধা এই যে সুষম পুরুত্বের এমন স্তর গঠন করা যায় যার পুরুত্ব কয়েক দশক মাইক্রো- (10^{-6}) মিটার হয় এবং তুলনামূলক বিশাল পৃষ্ঠ আয়তনের স্পষ্ট সীমারেখা দ্বারা আলাদা থাকে।

যে ভিত্তির উপরে ইপিটেক্সিয়াল স্তরটি জমা করা হয় তা বাছাইকৃতভাবে এচিং (etching) করা যায় যাতে জমাকৃত স্তরটি একটি পাতলা ও চ্যাপ্টা তালের ন্যায় পড়ে থাকে। এ প্রক্রিয়ায় বিশালায়তনের ডোপিত অর্ধপরিবাহীর ওয়াফার যুক্তিসঙ্গত খরচে উৎপাদন করার সম্ভাবনা রয়েছে। এটি তখন গতানুগতিক (conventional) অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী নির্মাণে ব্যবহার করা চলে। ১ মাইক্রোমিটারের মত পাতলা ইপিটেক্সিয়াল সিলিকন স্তরকেও পৃষ্ঠ-বাঁধ প্রেরণ (transmission) সন্ধায়ীরূপে

১.৬ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী চালনা বৈশিষ্ট্য (Operational characteristics)

১.৬.১ লীক বিদ্যুৎ প্রবাহ (Leakage current) : প্রচলিত রীতিতে জংশন সন্ধায়ীতে বিভব প্রয়োগ করলে অর্থাৎ জংশনকে বিমুখী বিভব ঝোঁকগ্রস্ত করলে মাইক্রোঅ্যাম্পিয়ার (microampere) পর্যায়ের স্বল্প সরাসরি বিদ্যুৎ (d. c) প্রবাহ সচরাচর লক্ষ্য করা যায়। এ লীক বিদ্যুৎ প্রবাহের উৎস হচ্ছে সন্ধায়ীর বিপুল আয়তন ও পৃষ্ঠদেশ। অভ্যন্তরীণভাবে সন্ধায়ীর আয়তনে উদ্ভূত বিপুল লীক বিদ্যুৎ প্রবাহ কার্য সম্পাদন পদ্ধতির (mechanism) যে কোনো একটির কারণে হতে পারে।

বাহক রিক্তকৃত (depleted) অঞ্চলে আড়াআড়িভাবে প্রযুক্ত বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের দিক এরূপ যে সন্ধায়ীর স্বাভাবিক p-অঞ্চল ও n-অঞ্চল থেকে রিক্তকৃত অঞ্চলের প্রান্ত পর্যন্ত যে কোনো সংখ্যাগরিষ্ঠ বাহক জংশন থেকে তাড়িয়ে দেয়া হয়। এমতাবস্থায় সংখ্যালঘিষ্ঠ বাহক উভয়ের যে কোনো ক্ষেত্রেই আকর্ষিত হয় এবং জংশনের এপার-ওপার (across) পরিবাহিত হয়। যেহেতু সংখ্যালঘিষ্ঠ বাহক জংশনের উভয় পাশে অনবরত উৎপাদিত হয়ে থাকে এবং ব্যাপনের জন্যও অবাধ মুক্ত থাকে তাই জংশনের ক্ষেত্রফলের প্রায় সমানুপাতিক সুস্থিত-অবস্থার বিদ্যুৎ প্রবাহ ঘটে। অধিকাংশ ক্ষেত্রেই সংখ্যালঘিষ্ঠ বাহকজনিত বিদ্যুৎ প্রবাহ অল্প হয় এবং কদাচিৎ গুরুত্বপূর্ণ লীকের (leak) উৎস হয়।

বিপুলায়তন লীকের দ্বিতীয় উৎস বাহক খালিকৃত অঞ্চলে তাপায়নের ফলে উৎপাদিত ইলেকট্রন-হোল জোড়া ; খালিকৃত অঞ্চলের আয়তন বৃদ্ধির সাথে সাথে এ উৎপাদনও বৃদ্ধি পায় এবং কেবল বস্তুটিকে ঠাণ্ডা করেই তা হ্রাস করা চলে। স্বাভাবিক আকারের সিলিকন সন্ধায়ীকে গৃহ তাপমাত্রায় ব্যবহার করা যায় কেননা তাপায়নে উৎপাদিত বিদ্যুৎ প্রবাহ অতি নগণ্য হয়। কিন্তু নিষিদ্ধ ব্যান্ডের গ্যাপ (gap) শক্তির পরিমাণের উপর নির্ভর করে (স্বল্প হলে) গৃহতাপের চেয়ে হ্রাসকৃত তাপমাত্রায় চালনা করা প্রয়োজন।

জংশনের স্বল্প দূরত্বে তুলনামূলকভাবে বিভবের উচ্চ নতি (gradient) থাকলে জংশনটির কিনারে পৃষ্ঠ লীকের প্রভাব পড়বে। বিভিন্ন পরিস্থিতি যেমন : সন্ধায়ী ক্যাপসুলাবদ্ধকরণের ধরন, আর্দ্রতা এবং সন্ধায়ী পৃষ্ঠের যে কোনো দূষণ যেমন, আঙ্গুলের ছাপ, তৈল, গ্রীজ বা অন্যান্য ঘনায়নযোগ্য বাষ্প জমা হওয়া ইত্যাদির উপর নির্ভর করে পৃষ্ঠ লীকের পরিমাণ বেশ পরিবর্তিত হয়ে থাকে। তাই লীক হ্রাসের প্রয়োজনে পরিষ্কার-পরিচ্ছন্নতার উপর সর্বাধিক গুরুত্ব দেয়া অত্যাবশ্যকীয়। লীক বিদ্যুৎ প্রবাহ শক্তি পৃথককরণের উপর প্রভাব ফেলা ছাড়া সন্ধায়ী চালনায় আরো একটি ব্যবহারিক প্রভাব ফেলে থাকে। সংকেতকে বিচ্ছিন্নকরণের জন্য সন্ধায়ীর ঝোঁক বিভব অনুক্রমিক রোধের মাধ্যমে প্রয়োগ করা হয়। ফলে জংশনে

প্রযুক্ত সত্যিকার বিভবটি বিভব উৎস থেকে প্রযুক্ত বিভবের চেয়ে লীক বিদ্যুৎ প্রবাহ ও রোধকের গুণফলের চেয়ে কম হয়ে থাকে। লীক বিদ্যুৎ প্রবাহ বেশ বড় হলে রোধকের মধ্যে দিয়ে ড্রপ (drop) সন্ধায়ীতে প্রযুক্ত সত্যিকার বিভবকে অনেক কমিয়ে দিতে পারে। তাই বিভব সরবরাহকেও এ ক্ষতিটুকু পুষিয়ে নেয়ার মত পর্যায়ে বাড়িয়ে নিতে হবে। তাই বিভব সরবরাহ লাইনে একটি অ্যামিটারের সাহায্যে লীক বিদ্যুৎ প্রবাহ পর্যানুসরণ (monitor) করা দরকার। তাতে সন্ধায়ীর অস্বাভাবিক আচরণ শুরু হওয়া থেকেই অনুমান করা যায়। দীর্ঘদিন ধরে লীক বিদ্যুতের আচরণ পর্যানুসরণ করলে সন্ধায়ীর বিকিরণজনিত ক্ষয়ক্ষতির ধরন সম্বন্ধেও ধারণা জন্মে।

১.৬.২ সন্ধায়ীর নয়েজ ও শক্তি পৃথককরণ (Detector noise and energy resolution) : সন্ধায়ীর নয়েজের উৎসসমূহকে তিনটি শ্রেণিতে দলবদ্ধ করা যায়। যথা :

(ক) সাধারণভাবে শট নয়েজ (shot noise) বলে পরিচিত উৎপাদিত বিপুলায়তন লীক বিদ্যুৎ প্রবাহে উঠানামা।

(খ) পৃষ্ঠ লীক বিদ্যুৎ প্রবাহে উঠানামা ; এবং

(গ) অনুক্রমিক রোধ বা সন্ধায়ীতে অনুত্তম (poor) বৈদ্যুতিক সংযোগের সাথে জড়িত জনসন নয়েজ।

প্রথমোক্ত উৎসটির নয়েজ হ্রাস ঘটানো সম্ভব কেবল কৃস্টালের তাপমাত্রা হ্রাসকরণের মাধ্যমে। পৃষ্ঠদেশ থেকে লীক অধিকতর পরিবর্তনশীল ; এটি সন্ধায়ীর নির্মাণ পদ্ধতি এবং অতীত ইতিহাসের উপর নির্ভরশীল। নয়েজের তৃতীয় উৎসের মধ্যে অন্তর্ভুক্ত রয়েছে আংশিক খালিকৃত জংশন সন্ধায়ী ও পৃষ্ঠ বাঁধ সন্ধায়ীর অখালিকৃত (undepleted) অঞ্চলের অনুক্রমিক (series) রোধ। সাযগ্রিকভাবে খালিকৃত সন্ধায়ী ব্যবহারের মাধ্যমে এ অবদান অপসারণ করা যেতে পারে।

উপরিউক্ত নয়েজ উৎসগুলো বর্গে সংযোগ হয়, যাতে :

$$\left(\Delta E_{noise}\right)^2 = \left(\Delta E_{bulk}\right)^2 + \left(\Delta E_{surface}\right)^2 + \left(\Delta E_{Johnson}\right)^2$$

যেখানে $\Delta E \rightarrow$ প্রতিটি স্বাধীন মেকানিজমের জন্য স্পন্দ শৃঙ্গের বিস্তার (peak broadening)।

আধান বাহকসমূহের উৎপাদনের পরিসংখ্যানিক উঠানামার দরুন নয়েজ বিস্তার প্রশস্ততার সাথে বর্গ অনুযায়ী সন্নিবিষ্ট হয়। সন্ধায়ীর ফাঁদে বাহক আবদ্ধ করার প্রভাব গুরুত্ববহ হলে সমশক্তির বিকিরণের উৎস থেকে প্রাপ্ত স্পন্দ শৃঙ্গের নিম্ন শক্তির দিকে (side) পুচ্ছের আবির্ভাব থেকে এর প্রমাণ পাওয়া যায়। এ পুচ্ছগুলো

সামগ্রিক উৎপাদিত আধানের চেয়ে কম আধান সংগ্রহের ফলে উদ্ভূত তড়িৎ স্পন্দের দরুন আবির্ভূত হয়।

১.৬.৩ ঝোঁক বিভব পরিবর্তনের সাথে সন্ধায়ীর পরিবর্তন : ঝোঁক বিভব ও বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র কম থাকাকালে খালিকৃত অঞ্চলে সম্পূর্ণরূপে থেমে যায় এমন বিকিরণপাতের দরুন উৎপাদ তড়িৎ স্পন্দের উচ্চতা প্রযুক্ত বিভব বৃদ্ধির সাথে বেড়ে চলে। এ পরিবর্তনের কারণ ট্র্যাকে বাহকের ফাঁদে আবদ্ধ হওয়া বা পুনর্মিলনের দরুন অসম্পূর্ণ তড়িৎ আধান সংগ্রহ। বিভব বৃদ্ধির সাথে এ পর্যন্ত অসংগৃহীত এসব বাহকও সংগ্রহে পড়ে। মনে রাখতে হবে যে নিম্ন বিভবে গ্যাসীয় সন্ধায়ীতেও পুনর্মিলনের দরুন এ ধরনের অপচয় ঘটে থাকে। বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র পর্যাপ্ত পরিমাণে বৃদ্ধি করলে আধান সংগ্রহ সম্পূর্ণ হয় এবং তড়িৎ স্পন্দের উচ্চতা সন্ধায়ীর ঝোঁক বিভব আরো বৃদ্ধি করলেও তেমন পরিবর্তন হয় না। চালনা বৈশিষ্ট্যের এ অঞ্চলকে সংপৃক্ত (saturated) অঞ্চল বলে।

সমশক্তির একই ধরনের বিকিরণপাতের জন্য সন্ধায়ীর চালনা বিভব সংপৃক্ত মানের নিচে থাকলেও শক্তি পৃথককরণে তেমন একটি অবনমন (deterioration) ঘটে না কেননা আধান অপচয়ের পরিমাণ প্রতিটি সংঘটনে প্রায় অপরিবর্তিত থাকে। কিন্তু বিবিধ শক্তি ও আপেক্ষিক আয়নায়নের বিকিরণ পরিমাপনকালে শক্তি পৃথককরণে তাৎপর্যবহ অবনমন এড়াতে হলে সন্ধায়ীটির সঠিক সংপৃক্ত বিভব চালনা নিশ্চিত করা প্রয়োজন। ব্যাপ্ত জংশন সন্ধায়ীর জন্য সংপৃক্ত অঞ্চলে পৌঁছার জন্য পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীর চেয়ে কিছু কিছু উচ্চতর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র প্রয়োগ করা দরকার এবং বিকিরণপাতে ক্ষতিগ্রস্ত হওয়ার সাথে সাথে উভয়ের জন্যই বিভব বৃদ্ধির দরকার হয়।

বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র পর্যাপ্ত পরিমাণে উচ্চ হলে গুণন প্রভাব আবিষ্ট (induced) হয় যেমনটি ঘটে সমানুপাতিক ও গাইগার গ্যাসীয় সন্ধায়ীতে। প্রারম্ভিক মিথস্ক্রিয়ায় মুক্ত ইলেকট্রন প্রযুক্ত বিভবের দরুন যদি এমন পর্যাপ্ত শক্তি অর্জন করে যে সংগ্রহকারী তড়িৎদ্বারের দিকে ধাবণকালে আরো ইলেকট্রন-হোল জোড়া উৎপন্ন করতে পারে তাহলেই গুণন প্রক্রিয়া শুরু হয়ে যায়। ব্যাপ্ত জংশন সন্ধায়ী ও পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীর গুণন প্রক্রিয়া ও প্রভাব ভিন্ন ভিন্ন। ব্যাপ্ত জংশনে গুণন বুঝার উপায় হিসেবে দেখা যায় যে লাভ (gain) কম-বেশি সুষমভাবে বৃদ্ধি পায় এবং রেকর্ডকৃত তড়িৎ স্পন্দ উচ্চতা বৃহত্তর বিস্তারের দিকে ভ্রংশ (shift) হয় এবং সর্বনিম্ন প্রয়োজনীয় বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র বেশ উচ্চ হতে হয় (প্রায় 10^7 ভোল্ট প্রতি মিটারে)।

অথচ পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীর গুণনের প্রভাব সুষম নয় ; সমশক্তির বিকিরণ উৎস থেকে উৎসারিত স্পন্দ শৃঙ্গে উচ্চ শক্তির পাশে (side) পুচ্ছের আবির্ভাব থেকে তা সন্ধান করা যায়।

১.৬.৪ তড়িৎ স্পন্দের উত্থানকাল (Pulse rise time) : সচরাচর ব্যবহৃত সকল বিকিরণ সন্ধায়ীর মধ্যে সাধারণ জংশন বা পৃষ্ঠ-বাঁধ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী বৈশিষ্ট্যগতভাবে দ্রুততমদের অন্যতম। স্বাভাবিক অবস্থায় পর্যবেক্ষণে দেখা গেছে তড়িৎ-স্পন্দের উত্থান সময় 10×10^{-9} সেকেন্ড বা তারও কম হয়ে থাকে। এ উত্থান সময়ের মধ্যে সন্ধায়ীর অবদান হচ্ছে আধান গমনকাল (transit time) ও প্লাজমা সময় (Plasma time)। আপতিত বিকিরণপাতে সৃষ্ট ইলেকট্রন ও হোলসমূহের খালিকৃত অঞ্চলটির উচ্চ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র অভিপ্রয়াণে ব্যয়িত সময়টুকুই আধান গমনকাল। উৎপাদ তড়িৎ স্পন্দের উত্থান (rise) কাল তাই আধান বাহকসমূহের সৃষ্টিস্থল থেকে খালিকৃত অঞ্চলের বিপরীতে অবস্থিত শেষ প্রান্তে সম্পূর্ণ অভি-প্রয়াণে যে সময় দরকার হয় তার মধ্যে সীমিত থাকে। খালিকৃত অঞ্চলে স্বল্প বিস্তার ও উচ্চ প্রযুক্ত বিভবে এ সময় ন্যূনতম হয়। সামগ্রিকভাবে বাহক খালিকৃত সন্ধায়ীতে বাহকশূন্য অঞ্চলটি সিলিকন ওয়াফারের (wafer) ভৌত পুরুত্ব দ্বারা সুনির্ধারিত ; সুতরাং গমনে ব্যয়িত সময় প্রযুক্ত বিভব বৃদ্ধির সাথে সাথে হ্রাস পায়। আংশিক বাহক খালিকৃত সন্ধায়ীতে প্রযুক্ত বিভব বৃদ্ধির সাথে খালিকৃত প্রস্থ (width) বৃদ্ধি পায়, সুতরাং বৃহত্তর পরিসরের প্রযুক্ত বিভবের প্রভাব হচ্ছে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র ও তড়িৎ আধান সংগ্রহের দূরত্ব উভয়েরই বৃদ্ধি সাধন করা। তদুপরি বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র যেহেতু সর্বত্র সুষম নয় তাই ইলেকট্রন ও হোল-এর তাড়ন বেগ বিভ্ন অঞ্চল অতিক্রমণকালে পরিবর্তিত হয়ে চলবে। অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীতে তড়িৎ আধান গমনের কাল প্রযুক্ত বিভবের উপর বেশ জটিলভাবে নির্ভরশীল।

যে সব কণিকার যাত্রা পরিসর (range) খালি অঞ্চলের প্রস্থের চেয়ে কম তাদের ক্ষেত্রে সমুদয় আধান বাহক এক বাউন্ডারিতে (boundary) তৈরি হয়ে থাকে। একই ধরনের বাহকের সংগ্রহকাল পুরো খালি অঞ্চল দিয়ে এদের অভি-প্রয়াণের সময়ের অনুরূপ বলে অপর ধরনের বাহকের সংগ্রহকালের চেয়ে এটি দীর্ঘ-তর হয়ে থাকে। n-type কৃস্টালবিশিষ্ট পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে তাই ইলেকট্রন সংগ্রহকাল দুর্বল বিদীর্ণকারী কণিকার সাড়া কাল (response time) নিয়ন্ত্রণ করে থাকে। ইলেকট্রনের চলিষ্ণুতা (mobility) অপরিবর্তিত ধরে এমতাবস্থায় গমনকাল দাঁড়ায় :

$$t_{constant} = \frac{0.53\, d^2}{\mu V} \qquad (১.১৬)$$

যেখানে $t_{constant}$ → গমনকাল সেকেন্ড, d → বাহক খালি অঞ্চলের প্রস্থ, μ→ ইলেকট্রনের চলিষ্ণুতা ($cm^2/v\text{-}s$) এবং V প্রযুক্ত বিভবের মান। পরীক্ষণ-পর্যবেক্ষণে দেখা গেছে যে ভারি আয়নায়ন কণিকার জন্য স্পন্দের উত্থানকাল (rise time) সমীকরণ (১.১৬) দ্বারা পূর্বাভাসকৃত মানের চেয়ে বেশ দীর্ঘতর হয়ে থাকে। এ থেকে বুঝা যায় যে এসব ক্ষেত্রে স্পন্দের উত্থানকালের একটি অতিরিক্ত উপাংশ (component) রয়েছে।

ভারি তড়িৎ আধানবাহী কণিকা যেমন, আলফা অথবা ফিশন বণ্ড (fission fragment) আপতিত বিকিরণের অন্তর্ভুক্ত থাকলে, প্লাজমা সময় (plasma time) নামে দ্বিতীয় একটি উপাংশও পর্যবেক্ষণে ধরা পড়ে। এসব বিকিরণের ক্ষেত্রে কণিকাটির ট্র্যাকে ইলেকট্রন-হোল জোড়ার ঘনত্ব এমন পর্যাপ্ত হয় যে আধানের প্লাজমা-সদৃশ মেঘপুঞ্জ গড়ে উঠে যা অভ্যন্তরকে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাব থেকে শিল্ড (shield) করে রাখে। এ মেঘপুঞ্জের একদম বাইরের প্রান্তের আধান বাহকসমূহই কেবল বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবাধীন হয় এবং সাথে সাথে অভিপ্রয়াণ (migrate) করতে শুরু করে; বহিরাঞ্চল তাই ক্রমশ ক্ষয় পেয়ে চলে ফলে একসময় অভ্যন্তরীণ আধানসমূহও বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের আওতাধীনে চলে আসে এবং ছাড়নে (drift) নেমে পড়ে। আধান মেঘপুঞ্জ ছড়িয়ে পড়ে স্বাভাবিক আধান সংগ্রহ পর্যায়ে পৌঁছতে যে সময় অতিবাহিত হয় তাকেই প্লাজমা সময় বলা হয়।

প্লাজমা ক্ষয় প্রক্রিয়াকে বর্ণনা করার উদ্দেশ্যে বেশ কতিপয় তত্ত্বীয় মডেল চেষ্টা করা হয়েছে; এতে ধারণা করা হয়েছে যে ট্র্যাকের স্থলে প্লাজমা সময় বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের উল্টানুপাতে পরিবর্তিত হওয়া উচিত এবং ট্র্যাক বরাবরে রৈখিক বাহক ঘনত্বের ঘনমূল হিসেবে বৃদ্ধি পাবে। অভিজ্ঞতায় দেখা গেছে প্লাজমা সৃজনের ফলে তড়িৎ স্পন্দের উত্থানকালের সামগ্রিক ধীরায়নসহ (slowing) ট্র্যাক সৃজনের সময় ও উৎপাদ স্পন্দের উপরে উঠা শুরুর সময়ের মধ্যে এক সুনির্ধারিত বিলম্বকাল রয়েছে। আলফা কণিকার জন্য সিলিকন পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীর প্লাজমাকাল মেপে দেখা গেছে এটি কয়েক ন্যানোসেকেন্ড (10^{-9} সে.) পর্যায়ে হয়ে থাকে এবং ফিশন উৎপাদের ক্ষেত্রে $3—4 \times 10^{-9}$ সে. হয়।

কোনো সন্ধায়ীর পূর্বপরিবর্ধক সমাবেশের জন্য পর্যবেক্ষিত সময় পূর্বপরিবর্ধকের ধর্মাবলী দ্বারাও প্রভাবিত হতে পারে। আংশিক বাহক রিক্তকৃত সন্ধায়ীতে অরিক্তকৃত অঞ্চলের অনুক্রমিক রোধ অন্তর্গামী সময় ধ্রুবকের অন্যতম অবদানকারী বটে। ফলে দ্রুত সন্ধান কাজ সম্পাদনের ক্ষেত্রে অনুক্রমিক রোধের অবকাশ নেই বিধায় সম্পূর্ণরূপে বাহক রিক্তকৃত সন্ধায়ীসমূহই শ্রেয়।

১.৬.৫ প্রবেশ জানালা বা অসক্রিয় স্তর (Entrance window or dead layer) : ভারি তড়িৎ আধানযুক্ত কণিকা বা অন্যান্য দুর্বল স্বল্প বিদারী বিকিরণ সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকায় পৌঁছার আগেই গুরুত্ববহ পরিমাণ শক্তি অপচয় হয়ে যেতে পারে। সঠিক ক্ষতিপূরণের জন্য এভাবে অপচয়িত শক্তির পরিমাণ নিরূপণ করা দরকার।

সহজতম ও প্রায়ই ব্যবহৃত কলাকৌশলটি হচ্ছে সমশক্তির তড়িৎ আধানবাহী কণিকার জন্য আপতন কোণ পরিবর্তন করা। আপতন কোণ শূন্য হলে অপচয়িত শক্তির পরিমাণ দাঁড়ায় :

$$\Delta E_0 = \frac{dE_0}{dx} \cdot t \qquad (১.১৭)$$

যেখানে $t \rightarrow$ অসক্রিয় স্তরের পুরুত্ব।

আপতন কোণ 'θ' হলে শক্তি অপচয় দাঁড়ায় :

$$\Delta E(\theta) = \frac{\Delta E_0}{\cos\theta} \qquad (১.১৮)$$

সুতরাং আপতন কোণ 0 ও θ এর মধ্যবর্তী হলে তড়িৎ স্পন্দ উচ্চতার পার্থক্য হচ্ছে :

$$E' = ((E_0 - \Delta E_0) - E_0 - \Delta E(\theta))$$

$$= \Delta E_0 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right) \qquad (১.১৯)$$

আপতন কোণ পরিবর্তন করে অনেকগুলি পরিমাপন নিয়ে ছক কাগজে E' বনাম $\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)$ প্লট করলে একটি সরলরেখা পাওয়া যায় যার নতি (slope) ΔE_0, এখন সমীকরণ (১.১৭) থেকে অসক্রিয় স্তরের পুরুত্ব হিসাব করা সম্ভব।

সর্বাপেক্ষা পাতলা অসক্রিয় স্তর উৎপন্ন হয় পৃষ্ঠ-বাঁধ ধরনের (surface barrier type) অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীতে। নমুনাগতভাবে 100×10^{-9} মি. মানের সিলিকন সমপুরুত্বে 1 MeV শক্তির প্রোটনের জন্য শক্তি অপচয় ঘটে 4 keV, 5 MeV আলফা কণিকার জন্য অপচয় হয় 14 keV শক্তি এবং ফিশন উৎপাদের জন্য কয়েক শত keV। বিশেষ কৌশল ব্যবহারে 30×10^{-9} মি. এর অসক্রিয় স্তর উৎপাদন করা সম্ভব হয়েছে।

১.৬.৬ চ্যানেলকরণ (Channelling) : কেলাসিত পদার্থে কেলাস অক্ষের সাথে তড়িৎ আধানবাহী কণিকার চলার পথ দিকস্থিতির (orientation) উপর এর

শক্তি অপচয়ের হার নির্ভর করে। কেলাস সমতলের সমান্তরালে চলমান কণিকা আড়াআড়ি বা ইচ্ছামত দিকে চলমান কণিকার চেয়ে স্বল্প হারে শক্তি হারায়। তাই চ্যানেলকৃত কণিকা কেলাসে গুরুত্বপূর্ণভাবে অধিকতর দূরত্বে প্রবেশ করতে পারে। পাতলা সম্পূর্ণরূপে রিক্তকৃত সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে এ প্রভাব প্রবল, কেননা এ ক্ষেত্রে জমাকৃত শক্তি কণিকার চলার দিক অনুসারে কেলাস সমতলের দিকস্থিতির উপর নির্ভরশীল। সচরাচর এসব সন্ধায়ী কেলাস এমনভাবে কাটা হয় যে কেলাস পৃষ্ঠে খাড়াভাবে আপতিত আয়নায়নকারী বিকিরণের জন্য চ্যানেলের প্রভাব উপেক্ষণীয় পর্যায়ে থাকে।

সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকায় সম্পূর্ণরূপে থেমে পড়া পরিস্থিতিতেও উৎপাদ তড়িৎ স্পন্দে চ্যানেলকরণের প্রভাব থাকতে পারে। চ্যানেলকৃত কণিকার ক্ষেত্রে নিউক্লিয়াস সংঘর্ষের সম্ভাবনা তুলনামূলকভাবে স্বল্প, সুতরাং ভারি আয়নের ক্ষেত্রে তড়িৎ স্পন্দ উচ্চতার খুঁত (defect) হ্রাস করা যেতে পারে।

১.৬.৭ বিকিরণপাতজনিত ক্ষতি (Radiation damage) : যে কোনো অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী সঠিক চালনার জন্য কেলাসিত ল্যাটিস এমন হওয়া প্রয়োজন যে আধান বাহক আবদ্ধ করার মত খুঁত থাকবে না এবং অসম্পূর্ণ সংগ্রহ হবে না। যাহোক, ব্যাপক প্রয়োগের ফলে ল্যাটিসের কিছু কিছু ক্ষতি সাধিত হয়ে থাকে। বিকিরণের আঘাতে চূর্ণ বিচূর্ণ হওয়ার দরুন তা ঘটে। হাল্কা আয়নায়নকারী বিকিরণের ক্ষেত্রে (বিটা ও গামারশ্মিপাত) প্রভাবটি নগণ্য হয়ে থাকে। কিন্তু ভারি আয়নায়নকারী বিকিরণের ক্ষেত্রে এটি বেশ গুরুত্ববহ হয়ে উঠে। যেমন, সিলিকন সন্ধায়ীকে সুদীর্ঘ সময় ধরে ফিশন উৎপাদে সম্পাতগ্রস্ত (exposed) করলে লীক বিদ্যুৎ প্রবাহ বেড়ে যাবে এবং শক্তি পৃথককরণে গুরুত্বপূর্ণ অবনমন দেখা দেবে। চরম ক্ষতিগ্রস্ত হলে সমশক্তির কণিকার জন্যও তড়িৎ স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালীতে বহু স্পন্দ শৃঙ্গ দেখা দিতে পারে। অধিকন্তু সন্ধায়ীটির সময়বৈশিষ্ট্যও অবনমিত (degraded) হতে পারে।

বিকিরণপাতজনিত সর্বাধিক সাধারণ ধরনের ক্ষতি হচ্ছে ফ্রেঙ্কেল খুঁত (frenkel defect) ; অর্ধপরিবাহী পদার্থের পরমাণুর স্বাভাবিক ল্যাটিস স্থল থেকে স্থানচ্যুতি তথা সরণের (displacement) ফলে এ ধরনের ক্ষতি উৎপন্ন হয়। পিছনে ফেলে যাওয়া শূন্যস্থানসহ আদি পরমাণুটি স্বাভাবিক তড়িৎ আধানসমূহের জন্য ফাঁদ অবস্থানরূপে কাজ করে। এ ধরনের পর্যাপ্ত খুঁত সৃজনের পর বাহকের আয়ু হ্রাস পায় এবং সন্ধায়ীর শক্তি পৃথককরণ এটি হতে হারিয়ে যাওয়া আধানের পরিমাণের উঠানামার দরুন অবনমিত হয়ে পড়ে। লীক বিদ্যুৎ প্রবাহের বৃদ্ধি ধার প্রভাবের (edge effect) সাথে অধিকতর সরাসরি সম্পর্কিত বলে প্রতিভাত হয় এবং লীক বিদ্যুৎ প্রবাহে উঠানামার ফলে শক্তি পৃথককরণে তদনুরূপ অপচয়

(loss) দেখা দেয়। দীর্ঘ সময়ে কতকটা নগণ্য পরিমাণে বিকিরণজনিত ক্ষতির অ্যানিলকরণ (annealing) ঘটে, তবে সর্বক্ষেত্রেই ক্ষতিটুকু চিরস্থায়ী হয়ে থাকে।

কোনো ফিশন উৎপাদ কর্তৃক উৎপাদিত ফ্রাঙ্কেল খুঁতের সংখ্যা আলফা কণিকার তুলনায় প্রায় 100—1000 গুণ বেশি হয়ে থাকে। অপরদিকে চরম অবস্থায় একটি আপতিত ইলেকট্রন বা বিটা কণিকার একটি খুঁত সৃজনের জন্য 145 keV শক্তির দরকার হয় এবং 250 keV এর কম শক্তির ইলেকট্রন নগণ্য পরিমাণ ক্ষতি সাধন করতে পারে। অর্ধপরিবাহী সিলিকন পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীর সোনা অথবা সম্মুখ পৃষ্ঠে বিকিরণপাতে সৃষ্ট ক্ষতির বিষয়ে পরীক্ষা নিরীক্ষায় প্রাপ্ত নানাবিধ তথ্য উপাত্ত প্রকাশিত হয়েছে। মারাত্মক ক্ষতি সাধিত হয় যখন বিকিরণপাত ঘটে দ্রুত গতিতে। প্রায় 10^{14} টি ইলেকট্রনপাত/(সে.মি.)^2, 10^{13}টি প্রোটনপাত/(সে. মি.)^2, 10^{11} টি আলফা কণিকাপাত/(সে. মি.)^2, 3×10^4 টি ফিশন খণ্ডপাত/(সে.মি.)^2, প্রায় 3×10^{21} টি নিউট্রনপাত/(সে.মি.)^2 এবং গামা-রশ্মিপাতের ক্ষেত্রে 10^6 R বিকিরণপাতে কার্য সম্পাদনায় গুরুত্বপূর্ণ অবনমন ঘটতে দেখা গেছে।

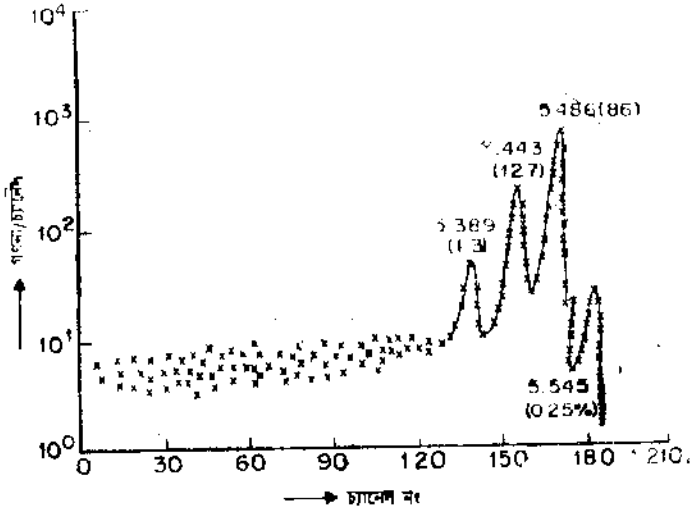
সুদূর বিদারী (penetrating) বিকিরণ যেমন, গামা বা নিউট্রনপাতে সমগ্র সন্ধায়ী জুড়ে ক্ষতি বিস্তৃত হয়ে থাকে এবং আপতিত বিকিরণের আপতন দিক তেমন কোনো প্রভাব ফেলে না। ইলেকট্রন অথবা আধান কণিকার ক্ষেত্রে সন্ধা-য়ীর অবস্থান দিকস্থিতি (orientation) বেশ গুরুত্ববহ। সামগ্রিকভাবে খালিকৃত সন্ধায়ীর সম্মুখ বা সোনা সংস্পর্শে বিকিরণপাতে সৃষ্ট ক্ষতি একই পরিমাণ বিকিরণ-পাতে পৃষ্ঠ (অ্যালুমিনিয়াম) সংস্পর্শে সৃষ্ট ক্ষতির চেয়ে বহুগুণে বেশি।

সাধারণভাবে ব্যাপ্ত জংশন সন্ধায়ী পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীর চেয়ে বিকিরণজনিত ক্ষতির প্রতি তুলনামূলকভাবে কম সুবেদী। সম্পূর্ণরূপে খালিকৃত অঞ্চলধারী সন্ধায়ী আংশিক খালিকৃত অঞ্চলধারী সন্ধায়ীর চেয়ে কম সুবেদী।

১.৬.৮ শক্তি ক্রমাঙ্কন (Energy calibration) : অর্ধপরিবাহী ডায়োড সন্ধায়ী দ্রুতগামী ইলেকট্রন বা হালকা আয়ন যেমন, প্রোটন বা আলফা কণিকা পরিমাপে বৈশিষ্ট্যিকভাবে সাড়া দেয় এবং এক ধরনের কণিকার জন্য প্রাপ্ত শক্তি ক্রমাঙ্কন উপাত্ত ভিন্ন ধরনের বিকিরণের খুবই কাছাকাছি হয়ে থাকে। পর্য-বেক্ষণে দেখা গেছে একই শক্তির প্রোটন ও আলফা কণিকার স্পন্দ উচ্চতায় পার্থক্য অত্যল্প (শতকরা ১ ভাগ বা তারও কম)। শক্তি ক্রমাঙ্কনের জন্য সন্ধায়ীকে যে বিকিরণ পরিমাপ করতে হবে ঠিক সে ধরনের বিকিরণ দ্বারা ক্রমাঙ্কন করাই সর্বোত্তম।

সর্বাধিক ব্যবহৃত ক্রমাঙ্কন উৎসটি হচ্ছে আলফা-নির্গমনকারী রেডিও আইসো-টোপ আমেরিসিয়াম-241 (5.486 MeV, 85 % and 5.443 MeV, 13 %)

যার প্রতিনিধিত্বমূলক স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালী ১.১২ চিত্রে দেখানো হলো। সঠিক ক্রমাঙ্কনের জন্য উৎসে স্ব-শোষণ, সন্ধায়ী ও উৎসের মধ্যবর্তী স্থানে বিদ্যমান পদার্থ এবং সন্ধায়ীর অসক্রিয় স্তরে শক্তি অপচয়ের পরিমাণ বিবেচনায় আনতে হবে।

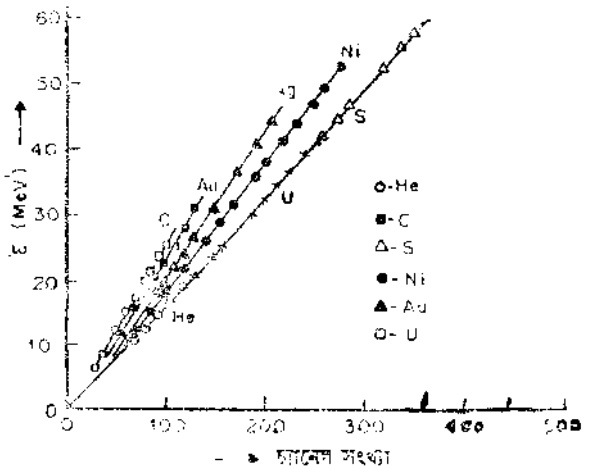


চিত্র ১.১২ : পৃষ্ঠ-বাধ সন্ধায়ী দ্বারা রেকর্ডকৃত আমেরিসিয়াম-241 থেকে উৎসারিত আলফা কণিকার শক্তি বর্ণালী।

১.৬.৯ তড়িৎ স্পন্দ উচ্চতায় খুঁত : অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী ভারি আয়ন যেমন ফিশন উৎপাদের প্রতি সরাসরি সাড়াদানে ততটা দক্ষ নয়। প্রায় ক্ষেত্রেই দেখা যায় ভারি আয়ন সৃষ্ট স্পন্দের উচ্চতা একই শক্তির হালকা আয়নের স্পন্দ উচ্চতার চেয়ে বাস্তবেই বেশ কম। তড়িৎস্পন্দ উচ্চতার খুঁত শক্তির এককে সংজ্ঞায়িত হয়ে থাকে ; ভারি আয়নের সত্যিকার (true) শক্তি ও আপাত (apparent) শক্তির পার্থক্যকে স্পন্দ উচ্চতার খুঁত বলা হয় এবং আলফা কণিকার সাহায্যে সন্ধায়ীর শক্তি ক্রমাঙ্কন করে তা নিরূপণ করা হয়।

তড়িৎ স্পন্দ উচ্চতার খুঁতের প্রভাব ছক কাগজে প্লটের সাহায্যে ১.১৩ চিত্রে দেখানো হলো। পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীকে ফিশন উৎপাদের দ্বারা বিকিরণকরণে সৃষ্ট স্পন্দ উচ্চতার খুঁত পরিমাপনে দেখা যায় যে খুঁতের মান 15 MeV এর মত বিশাল হওয়াও সম্ভব। বিশ্লেষণে দেখা গেছে তিন তিনটি স্বতন্ত্র ব্যাপার (phenomena) পর্যবেক্ষিত তড়িৎ স্পন্দ উচ্চতায় প্রভাব ফেলে। এদের প্রথম এবং সরলতমটি হচ্ছে আয়নটির প্রবেশ জানালা ও অসক্রিয়স্তরে শক্তি অপচয়। আয়নটিকে থামানোর ক্ষমতা (stopping power) এবং অসক্রিয় স্তরের পুরুত্ব পরিমাপনের দ্বারা এর প্রভাবের পরিমাণ জানা সম্ভব। যেহেতু ভারি আয়ন যেমন ফিশন উৎপাদ যাত্রা

পরিসরের শুরুতেই সর্বোচ্চ (dE/dx) দেখায় অথচ হাল্কা আয়ন তথা আলফা কণিকার ক্ষেত্রে ঘটে উল্টাটি, তাই ভারি আয়ন অসক্রিয়স্তরে গুরুত্বপূর্ণ পরিমাণ শক্তি হারায়। দ্বিতীয় অবদানকারীটি হচ্ছে ভারি আয়নের সাধারণ ধরনের ইলেকট্রনিক সংঘর্ষ ব্যতীত অন্য উপায়ে শক্তি অপচয়ের ঝোঁকগ্রস্ততা। আয়নের বেগ হ্রাস পাওয়ার সাথে সাথে নিউক্লিয়াস সংঘর্ষ গুরুত্ববহ হয়ে উঠে ; ফলে সরাসরি প্রতিক্ষেপ (recoil) নিউক্লিয়াস উৎপন্ন হয়। এ সকল প্রতিক্ষেপ নিউক্লিয়াসের নিম্ন বেগের দরুন ইলেকট্রনিক মিথস্ক্রিয়ার সম্ভাবনা হ্রাস পায় এবং ইলেকট্রন-হোল জোড়া উৎপাদনের দক্ষতায় নিট (net) হ্রাস দেখা যায়। আয়নের কার্যকর আধানের পরিমাণের সাথে বৃদ্ধি পায় নিউক্লিয়াস সংঘর্ষের অবদান এবং তা ভারি আয়নের

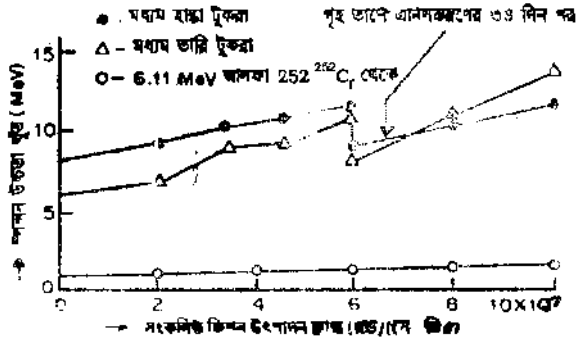


চিত্র ১.১৩ : বিভিন্ন আয়নের সত্যিকার শক্তি বনাম সিলিকন পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীর স্পন্দ উচ্চতা চ্যানেল প্লট।

জন্য সর্বাধিক গুরুত্বপূর্ণ। স্পন্দ উচ্চতায় খুঁতের তৃতীয় হেতুটি হচ্ছে ট্র্যাক বরাবরে বা তার শেষ মাথায় ইলেকট্রন-হোল পুনর্মিলনের উচ্চ হার। পুনর্মিলনের পরিমাণ প্রযুক্ত বিভব বৃদ্ধির সাথে হ্রাস পাবে বলে প্রত্যাশা করা যায় এবং সন্ধায়ীতে কণিকাটির যাতায়াত পথ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের দিকস্থিতির (orientation) উপরও নির্ভরশীল। স্পন্দ উচ্চতা খুঁত হ্রাসের একটি ব্যবহারিক পদ্ধতি হচ্ছে সন্ধায়ীতে সম্ভাব্য বৃহত্তম বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র প্রয়োগের মাধ্যমে যথাসম্ভব পুনর্মিলন ঠেকানো।

যেহেতু ফাঁদে আটকানো এবং পুনর্মিলন সন্ধায়ীর বিকিরণজনিত ক্ষতির দ্বারা প্রভাবিত হয়ে থাকে তাই ধারণা করা যায় যে স্বাভাবিক ব্যবহারে স্পন্দ উচ্চতা খুঁত

বাড়তে পারে। ১.১৪ চিত্রে সিলিকনের জন্য পরিমাপিত (measured) স্পন্দ উচ্চতা বনাম সংকলিত ফিশন উৎপাদ ফ্লাক্স বৈশিষ্ট্য দেখানো হলো। চিত্রে স্পন্দ উচ্চতা বর্ধিষ্ণু খুঁতের ঝোঁক স্পষ্ট দেখা যাচ্ছে। ফ্লাক্স (flux) থেকে অপসারণের কয়েক সপ্তাহ পরে বিকিরণজনিত ক্ষতির যে আংশিক অ্যানিলিকরণও ঘটে তাও দেখা যাচ্ছে (চিত্র ১.১৪)।



চিত্র ১.১৪ : সিলিকন সন্ধায়ীতে পরিমাপিত স্পন্দ উচ্চতার নির্ভরশীলতা বনাম ফিশন উৎপাদ সম্পাত বৈশিষ্ট্য।

১.৭ পৃষ্ঠবাঁধ ও ব্যাপ্ত জংশন সন্ধায়ীর প্রয়োগ

১.৭.১ সাধারণ তড়িৎ আধানযুক্ত কণিকার বর্ণালীবীক্ষণ (Spectroscopy) : ব্যবহারিক সন্ধায়ী হিসেবে ১৯৬০ সালের শুরুতে সিলিকন পৃষ্ঠবাঁধ এবং ব্যাপ্ত জংশনের উন্নয়ের পর ভারি তড়িৎ আধানবাহী কণিকার জন্য অধিকাংশ প্রয়োগেই এদের বাছাই করা হয়ে থাকে।

পৃষ্ঠবাঁধ ও ব্যাপ্ত জংশন সন্ধায়ীকে প্রায়ই বিটা কণিকা ও দ্রুতগামী ইলেকট্রন পরিমাপনে ব্যবহার করা হয়। এগুলি সাধারণত পাতলা হয় এবং সামগ্রিকভাবে খালিকৃত প্রেরণ সন্ধায়ীরূপে কাজ করে।

অন্যান্য প্রতিযোগী প্রযুক্তির তুলনায় অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর ব্যবহার প্রায়ই অনেক গুরুত্বপূর্ণ প্রয়োগে বিভিন্ন সুবিধা দিয়ে থাকে। তন্মধ্যে রয়েছে অত্যুত্তম শক্তি পৃথককরণ, নির্ভরযোগ্য স্থিতিশীলতা তথা তাড়ন থেকে মুক্তি, চমৎকার সময়গত বৈশিষ্ট্য, অত্যন্ত পাতলা প্রবেশ জানালা এবং চালনার সারল্য। আপেক্ষিকভাবে ক্ষুদ্র আকার বিশেষ বিশেষ পরিস্থিতে বেশ সুবিধাজনক কিন্তু সুপরিসর পৃষ্ঠতলের সন্ধায়ী দরকার হয় এমন প্রয়োগ ক্ষেত্রে সেগুলির সীমাবদ্ধতা রয়েছে। প্রায় ২০ বর্গসেন্টিমিটার

পৃষ্ঠতল আয়তনের সিলিকন পৃষ্ঠবাঁধ সন্ধায়ী বাণিজ্যিকভাবে পাওয়া যায় কিন্তু তদনুপাতে এদের বৃহৎ ধারকত্ব (large capacitance) ক্ষুদ্রতর সন্ধায়ীর চেয়ে স্বল্প শক্তি পৃথককরণ প্রদান করে। অধিকাংশ ক্ষেত্রে স্বাভাবিক আকার ১.৫ বর্গসেন্টিমিটার হয়। প্রায় ৫ মি. মি. পর্যন্ত গভীর রিক্ত অঞ্চল পাওয়া যায় বিশেষ অবস্থান-অবস্থায় (configurations) তবে অধিকাংশ সচরাচর ব্যবহৃত সন্ধায়ীর গভীরতা ২ মি.মি. বা তারও কম রিক্ত অঞ্চলে সীমিত থাকে।

সন্ধায়ীর বাহক খালিকৃত গভীরতা আপতিত ভারি আয়নের যাত্রা পরিসরের চেয়ে দীর্ঘতর হলে সন্ধায়ীর সাড়া অত্যন্ত সরল হয়। সমশক্তির আপতিত কণিকার জন্য পূর্ণ শক্তির একটি স্পন্দ শৃঙ্গ দেখা যায় কেননা আয়নটিকে বিক্ষেপ করে বাইরে পাঠানোর অথবা আংশিক শক্তি জমা করানোর মত কোনো প্রতিযোগী প্রক্রিয়া নেই। সামগ্রিকভাবে বাহক খালিকৃত সন্ধায়ীর জন্য খালি অঞ্চলের গভীরতা সাধারণভাবে সিলিকন ওয়াফারের পুরুত্বেই সমান আংশিক খালিকৃত সন্ধায়ীতে বিভব প্রয়োগে খালিকৃত অঞ্চলের গভীরতা বৃদ্ধি পায় যার সর্বোচ্চ মান অতিক্রমণ বিভব দ্বারা সীমাবদ্ধ হয়ে থাকে। নির্মাতাগণ সন্ধায়ীর বৈশিষ্ট্য বিবরণীতে (specifications) সম্ভাব্য সর্বোচ্চ বিভব এবং তদনুপাতে উদ্ভূত খালিকৃত অঞ্চলের গভীরতা প্রদান করে থাকে। সংশ্লিষ্ট বিকিরণের শক্তি মাপার দরকার না হয়ে শুধু ঘটনা সংখ্যা গণনা করতে হলে খালিকৃত অঞ্চলের গভীরতা কণিকাটির যাত্রা পরিসরের কম হলেও চলে যদি জমাকৃত শক্তি যন্ত্রের নয়েজের চেয়ে বড় হয় এবং পর্যাপ্ত উচ্চতার তড়িৎ স্পন্দ উৎপন্ন করে।

১.৭.২ আলফা কণিকা বর্ণালীবীক্ষণ (Alpha particle spectroscopy) : গৃহতাপে চালিত (operated) সিলিকন পৃষ্ঠবাঁধ সন্ধায়ী আলফা কণিকা ও অন্যান্য হালকা আয়নের জন্য একটি আদর্শ সন্ধায়ী। যেহেতু সমশক্তির আলফা কণিকার যথেষ্ট উৎস রয়েছে তাই অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর কার্য সম্পাদনা অনুরূপ একটি উৎস থেকে প্রাপ্ত স্পন্দ উচ্চতা রেকর্ড করে পরখ করা যেতে পারে। এসব উৎসের মধ্যে সর্বাধিক সাধারণটি হচ্ছে ^{241}Am এবং এর আলফা বর্ণালী কঠিনাবস্থার সন্ধায়ীর শক্তি পৃথককরণে ও অন্তঃতুলনায় ব্যাপক ব্যবহৃত হয়। উক্ত শক্তি পৃথককরণে সক্ষম সন্ধায়ীর সাহায্যে গৃহীত প্রতিনিধিত্বমূলক বর্ণালী ১.১২ চিত্রে প্রদান করা হয়েছে।

এ শক্তির (5.49 MeV) আলফা কণিকার জন্য বর্ণালীর স্পন্দ শৃঙ্গ বিস্তারে পূর্বপরিবর্ধক ও অন্যান্য ইলেকট্রনিক যন্ত্রের অবদান সন্ধায়ীর নিজস্ব সহজাত শক্তি পৃথককরণের তুলনায় সচরাচর স্বল্প হয়; বাণিজ্যিকভাবে প্রাপ্ত সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে ^{241}Am এর আলফা কণিকার শক্তি পৃথককরণ 12keV এর মত স্বল্প হতে দেখা গেছে। পৃষ্ঠবাঁধ সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে বৈশিষ্ট্যগত গড় মান প্রায় 20 keV হয়।

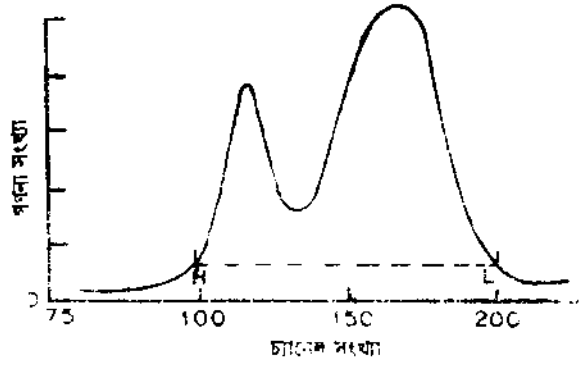
নিম্ন শক্তির আলফা কণিকার ক্ষেত্রে ইলেকট্রনিক নয়েজ আর উপেক্ষণীয় পর্যায়ে থাকে না। শক্তি পৃথককরণ প্রশস্ত হওয়ার অন্যান্য উৎসগুলি হচ্ছে আধান বাহক পরিসংখ্যান, অসম্পূর্ণ আধান সংগ্রহ এবং অসক্রিয় স্তরে শক্তি অপচয়ের পরিবর্তন।

১.৭.৩ ভারি আয়ন এবং ফিশন ভগ্নাংশের বর্ণালীবীক্ষণ (Heavy ion and fission fragment spectroscopy) : বিশাল তরের ফিশন খণ্ড বা অন্যান্য আয়নের শক্তি নিরূপণে কতিপয় বিশেষ গুরুত্ববহ বিষয় রয়েছে। এদের অধিকাংশ আয়ন ট্র্যাক (track) বরাবরে আধান বাহকের উচ্চ ঘনত্ব থেকে উদ্ভূত হয়। ইলেকট্রন-হোল জোড়ার পুনর্মিলন গুরুত্ববহ হয়ে উঠে এবং সন্ধায়ীর তখন আলফা কণিকার সংকেতকে সংপৃক্ত করতে যে বিভব ঝোঁক (bias) দরকার তার চেয়ে উচ্চতর বিভব দরকার হতে পারে। এ উচ্চ বাহক ঘনত্ব প্রাগুক্ত স্পন্দ উচ্চতা খুঁতও জোরালো করে তোলে বলে শক্তি ক্রমাঙ্কন কার্যপ্রণালীও জটিল হয়ে পড়ে। ভারি আয়ন বা ফিশন খণ্ডের প্রলম্বিত সম্পাতে (exposure) এবং বিকিরণজনিত ক্ষতির কারণে সন্ধায়ীর **কার্যসম্পাদন** (performance) ক্ষমতায় অবনমন ঘটে।

সন্ধায়ী উৎপাদনকারিগণ ভারি আয়নের বর্ণালীবীক্ষণের জন্য বিশেষভাবে **উপযোগী পৃষ্ঠবাঁধ** সন্ধায়ী প্রয়োজনমত উৎপাদন করে থাকে। এগুলো এমনভাবে প্রণয়ন করা হয় যেন উৎপাদ স্পন্দের ধীরে উত্থান (rise) সময় এবং উচ্চতা খুঁত সংক্রান্ত সমস্যাদি (যা কণিকার ট্র্যাকে উচ্চ মাত্রায় শক্তি অপচয়ের জন্য ঘটে) ন্যূনতম পর্যায়ে থাকে। তজ্জন্য সর্বাপেক্ষা কার্যকর পদক্ষেপ হচ্ছে সম্ভাব্য সর্বোচ্চ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র প্রয়োগ নিশ্চিত করা। এর এক উপায় সিলিকনের নিম্ন রোধকত্বের সরু ফালি ব্যবহার করে সামগ্রিকভাবে বাহক শূন্য সন্ধায়ী প্রস্তুত করা। স্বতঃস্ফূর্তভাবে ফিশনগ্রস্ত আইসোটোপ কালিফোর্নিয়াম-252 (252Cf) এর ফিশন খণ্ডের বর্ণালী পর্যবেক্ষণ করে ভারি আয়ন সন্ধানের মাধ্যমে সংশ্লিষ্ট সন্ধায়ীর কার্যসম্পাদনের মান নিরূপণ করা যায়। উক্ত আইসোটোপটির পাতলা উৎস অনায়াসেই তৈরি করা যায়। তাই সন্ধায়ীর বৈশিষ্ট্য মনিটরিংয়ে এটি ব্যাপকভাবে ব্যবহৃত হয়। উত্তম গুণমানের সিলিকন পৃষ্ঠবাঁধ সন্ধায়ী দ্বারা গৃহীত 252 Cf এর ফিশন খণ্ডের বর্ণালী ১.১৫ চিত্রে প্রদান করা হলো ; বর্ণালীটি শক্তি ক্রমাঙ্কন, সন্ধায়ীর শক্তি পৃথককরণে নিম্ন শক্তির পুচ্ছায়ন এবং অভ্যন্তরীণ গুণনের জন্য উদ্ভূত যে কোনো প্রভাব বিষয়ে সঠিকতা যাচাইয়ের জন্য ব্যবহার করা যায়।

স্বরক যন্ত্রে উৎপাদিত সমশক্তির বিভিন্ন ভারি আয়নের স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালী পরীক্ষণে দেখা গেছে যে, যে কোনো ভারি আয়ন গোষ্ঠীর ক্ষেত্রেই শক্তি বনাম স্পন্দ উচ্চতার গাণিতিক সম্পর্কটির রূপ হচ্ছে :

$$E = ax + b$$



চিত্র ১.১৫ : ^{252}Cf ফিশন খণ্ডের স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালী (বর্ণালীটি শক্তি ক্রমাঙ্কন ও সন্ধানী মূল্যায়নে ব্যবহার করা যেতে পারে)।

যেখানে E হচ্ছে আয়নের শক্তি এবং x হচ্ছে স্পন্দ উচ্চতা। সুদীর্ঘ শক্তি পরিসরের জন্য এ সম্পর্কটি কার্যকর প্রমাণিত হয়েছে। বিভিন্ন আয়ন পর্যবেক্ষণে দেখা গেছে m ভরের আয়নের জন্য সাধারণ সম্পর্কটি হচ্ছে :

$$E(x, m) = (a + a'm)x + b + b'm \qquad (১.২০)$$

যেখানে a, a', b ও b' সন্ধায়ীর বিশেষ বিশেষ বৈশিষ্ট্য। চিত্র ১.১৫ থেকে ^{252}Cf এর বর্ণালী বিশ্লেষণে এদের নিম্নরূপ মান পাওয়া গেছে :

$$a = 24.0203/(P_L - P_H)\ (MeV/channel)$$

$$a' = 0.03574/(P_L - P_H)\ (MeV/channel)$$

$$b = 89.6083 - aP_L\ (MeV)$$

$$b' = 0.1370 - a'P_L\ (MeV/amu)$$

যেখানে, P_L ও P_H হচ্ছে চিত্রের L ও H এর অনুসারী চ্যানেল সংখ্যা। প্রলম্বিত সময় ধরে বিকিরণপাতে উদ্ভূত ক্ষতির ফলে কার্য সম্পাদনা অবনমনের প্রারম্ভটি সময় সময় কালিফোর্নিয়াম দ্বারা প্রাপ্ত বর্ণালীটিকে পর্যানুসরণে (monitoring) অনুমান করা যেতে পারে।

১.৭.৪ **শক্তির অপচয় পরিমাপন—কণিকা শনাক্তকরণ** (Energy loss measurements—particle identification) : এ যাবৎ অর্ধপরিবাহীর বাহক শূন্য অঞ্চলে সামগ্রিকভাবে থামানো তড়িৎ আধানযুক্ত কণিকার বর্ণালীবীক্ষণের বিষয়ে আলোকপাত করা হয়েছে। এক্ষেত্রে সৃষ্ট আধান বাহকের সংখ্যা আপতিত বিকিরণের সমুদয় শক্তির সমানুপাতিক হয়ে থাকে। কোনো কোনো প্রয়োগের

ক্ষেত্রে কণিকাটির সুনির্দিষ্ট শক্তি অপচয়, (dE/dx) প্রয়োজন হয়ে পড়ে। এসব প্রয়োগে কণিকার যাত্রা পরিসরের চেয়ে সরু সন্ধায়ী বেছে নেয়া হয়। স্বল্প পুরুত্বের সন্ধায়ীর Δt পুরুত্বে সৃষ্ট আধান বাহকের সংখ্যা সাধারণভাবে $(dE/dx).\Delta t$ টি। যদি কণিকাটি পুরোপুরিভাবে সন্ধায়ীটিকে অতিক্রম করে যায় তাহলে (dE/dx) এর সমানুপাতিক একটি সংকেত দেখা যায়। এ ধরনের সন্ধায়ীসমূহকে ΔE সন্ধায়ীও বলা হয়।

এরূপ পরিমাপনের জন্য নানা ধরনের সন্ধায়ী ব্যবহার করা হয়। পাতলা ফিল্ম সিন্টিলেটর সমরূপ পুরুত্বে তৈরি করা গেলেও উত্তম শক্তি পৃথককরণ পাওয়া যায় না। অপরদিকে ১০ মাইক্রোমিটার এর মত পাতলা অর্ধপরিবাহী (wafer) দিয়ে সামগ্রিকভাবে বাহক খালিকৃত সন্ধায়ী তৈরি করা যায় যা অতি চমৎকার শক্তি পৃথককরণ প্রদান করতে পারে। সেজন্য পুরুত্বের সর্বত্র সমসত্ত্বতা একান্তই অপরিহার্য। উদাহরণস্বরূপ বলা যায় যে 20 মাইক্রোমিটার (10^{-6}) পুরুত্বের মধ্যে 1 মাইক্রোমিটারের পরিবর্তন উৎপাদ সংকেতে শতকরা পাঁচ ভাগ পরিবর্তন ঘটায় এবং শক্তি পৃথককরণে তুলনামূলকভাবে আরো অনেক বেশি পরিবর্তন আনয়ন করে।

স্বল্প-শক্তি কণিকার জন্য যাত্রা পরিসর এত হ্রস্ব হয়ে থাকে যে এমনকি সরুতম সিলিকন সন্ধায়ীও ব্যবহার করা যায় না। তাই গ্যাসীয় আধানায়ন বা সমানুপাতিক সন্ধায়ী প্রয়োগ করা হয়; এদের সুবিধা এই যে পুরুত্ব সুষম (uniform) করা যায় এবং গ্যাসের চাপ নিয়ন্ত্রণ করে খাপ খাওয়ানো যায়।

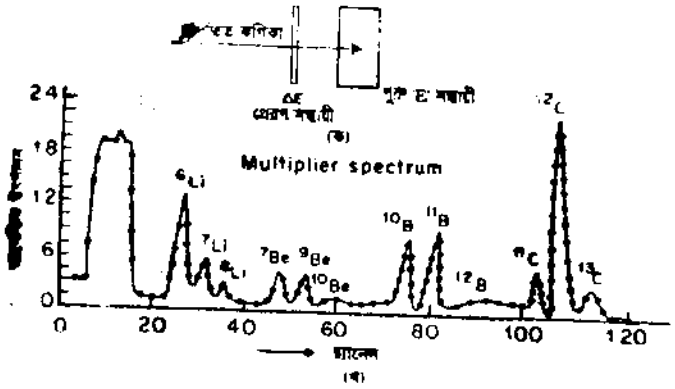
স্বাভাবিক পৃষ্ঠবাঁধ বা অপর কোনো পুরু (thick) সন্ধায়ীর সংযোগে প্রেষণ-সন্ধায়ীকে (transmission detector) কণিকা শনাক্তকারী টেলিস্কোপ (particle identifier telescope) রূপে ১.১৬ চিত্রে প্রদর্শিত বিন্যাসে সচরাচর ব্যবহার করা হয়ে থাকে। যেসব সংঘটন (events) দুটি সন্ধায়ীতেই সমাপতনে (coincidence) ঘটে কেবল তাদেরকেই গ্রহণ করা হয় এবং যুগপৎভাবে (dE/dx) এবং E এর মানও প্রতিটি আপতিত কণিকার জন্য পরিমাপ করা হয়।

m ভরবাহী ও Ze তড়িৎ আধানবিশিষ্ট অনাপেক্ষিক কণিকার ক্ষেত্রে বেথের সূত্র (Bethe's formula), প্রথম খণ্ডে (সমীকরণ ২.২) পূর্বাভাস দেয় যে,

$$\frac{dE}{dx} = C_1 \frac{mz^2}{E} \ln C_2 \frac{E}{m} \qquad (১.২১)$$

যেখানে C_1 ও C_2 হচ্ছে ধ্রুবক। গুণফল $(E) \cdot \left(\frac{dE}{dx}\right)$ কণিকাটির শক্তির উপর মৃদুভাবে নির্ভরশীল হলেও mz^2 এর সংবেদনশীলতা নির্দেশক কেননা এটি কণিকাটির বৈশিষ্ট্য তুলে ধরে। আপতিত বিকিরণটি কাছাকাছি শক্তির বিভিন্ন

কণিকার সংমিশ্রণে গড়ে উঠলে উভয় সন্ধানীর স্পন্দ বিস্তারের গুণফল প্রতিটি আলাদা কণিকার জন্য এক একটি অনুপম প্যারামিটার (unique parameter) হয়। যেহেতু $\triangle E$ এবং E সন্ধানীসমূহের স্পন্দ বিস্তার যোগ করে আপতিত শক্তি পাওয়া যায়, তাই প্রতিটি আপতিত কণিকার ভর ও শক্তি উভয়কেই যুগপৎভাবে নিরূপণ করা সম্ভব। ১.১৬(খ) চিত্রে E. $\triangle E$ এর বিতরণ দেখাচ্ছে যাতে কিছু সংখ্যক স্বতন্ত্র উপাদান পৃথক করা যাচ্ছে।



চিত্র ১.১৬ : (ক) টেনডেম (tandem) সন্ধানী $\triangle E$ ও E দ্বারা গঠিত কণিকা শনাক্তকারীর বিন্যাস। (খ) বিভিন্ন আয়নের মিশ্রণের পরীক্ষণলব্ধ পুরুত্ব $\triangle E$, E এর শক্তি স্পন্দ বর্ণালী সংকেত।

একটি বিকল্প অভিগমন (approach) হচ্ছে যে ব্যাপক ও বিভিন্ন ধরনের তড়িৎ আধানযুক্ত কণিকাসমূহের যাত্রা পরিসর (range) R এবং শক্তি E নিম্নোক্ত গাণিতিক সূত্র দ্বারা সম্পর্কিত :

$$R(E) = a\,E^b \qquad (১.২২)$$

যেখানে a ও b হচ্ছে ধ্রুবক। আপতিত কণিকাটি $\triangle t$ পুরুত্বের প্রেরণ-সন্ধানীতে $\triangle E$ শক্তি জমা করলে এবং এর অবশিষ্ট শক্তি E_r পুরু সন্ধানীতে জমা হলে :

$$\triangle t = R(E_r + \triangle E) - R(E_r)$$

$$\triangle t/a = (E_r + \triangle E)^b - E_r^b \qquad (১.২৩)$$

a এর মান ধ্রুবক এবং $1/mz^2$ এর সমানুপাতিক। একই রকম ভরের জন্য b খুব একটা বদলায় না ($b = 1.73$ প্রোটনের জন্য এবং $b = 1.65$ কার্বন আয়নের জন্য)। সুতরাং b এর যুক্তিযুক্ত মান বেছে নিয়ে সমীকরণ ১.২৩

অনুযায়ী ΔE ও E_r এর উপর সংকেত-প্রক্রিয়া পরিচালনা করে কণিকার বৈশিষ্ট্য নির্দেশক একটি প্যারামিটার (parameter) পাওয়া যাবে যা আবার শক্তির উপরও নির্ভরশীল নয়। ΔE ও E পরিমাপনের উপর ভিত্তি করে কণিকাসমূহের মিশ্রণ থেকে পৃথক করে শনাক্ত করার যে কোনো পদ্ধতির ক্ষমতার উপর প্রাথমিক সীমা-বদ্ধতাটি স্থাপিত হয় শক্তির অনিয়মিত স্ট্রাগলিং (straggling) দ্বারা সৃষ্ট ΔE সংকেতের উঠানামার ফলে।

গাণিতিক সমস্যা

১। গৃহ তাপমাত্রা থেকে তরল নাইট্রোজেনের তাপমাত্রায় শীতল করলে জার্মানিয়ামে কি পরিমাণে তাপীয় ইলেকট্রন-হোল জোড়া উৎপাদন হ্রাস পাবে?

২। সারণি ১.১-এ প্রদত্ত উপাত্ত থেকে কোনো কণিকার 100 keV শক্তি অপচয়ে সিলিকনে উৎপন্ন ইলেকট্রন-হোল জোড়ার সংখ্যার গড় মান ও অনিত্যতা (variance) কত?

৩। একটি আংশিক বাহক খালিকৃত সিলিকন পৃষ্ঠবাঁধ সন্ধায়ী পর্যাপ্ত প্রযুক্ত বিভব ঝোঁকে (bias) চালনা করা হচ্ছে যেন রিক্ততার গভীরতা (depletion depth) 5 MeV আলফা কণিকার যাত্রা পরিসরের চেয়ে বহুগুণে বেশি হতে পারে। প্রযুক্ত বিভব শতকরা 5 ভাগ পরিবর্তিত হলে স্পন্দ বিস্তার কতটুকু পরিবর্তিত হবে?

৪। এক পরীক্ষণে শূন্য শক্তি মাল্টিচ্যানেল অ্যানালাইজারের (multichannel analyser) শূন্য চ্যানেলে ^{252}Am এর 5.486 MeV আলফা শক্তি পড়েছে ১১৬ নং চ্যানেল। 21.0 MeV শক্তির ভারি আয়ন ৪০২ নং চ্যানেলে পড়ে থাকলে স্পন্দ উচ্চতা খুঁত (pulse height defect) কত?

দ্বিতীয় অধ্যায়

লিথিয়াম তাড়িত জার্মানিয়াম সন্ধায়ী
(Lithium Drifted Germanium Detector)

২.১ ভূমিকা

ব্যাপ্ত জংশন এবং পৃষ্ঠবাঁধ সন্ধায়ী আলফা কণিকা এবং অপরাপর হ্রস্ব যাত্রা পরিসরের বিকিরণ সন্ধানে বেশ উপযোগী বিধায় বহুল ব্যবহৃত হয়ে চলেছে। তবে সুদূর বিদারী বিকিরণের জন্য সহজে খাপ খাওয়ানো যায় না বলে তা তেমন উপযোগী নয়। এদের প্রধান বাঁধা এদের বাহক শূন্য অঞ্চলের গভীরতা বা অল্প সক্রিয় সন্ধান এলাকা। প্রাপ্ত সর্বোচ্চ রোধকত্বধারী পদার্থ এবং অতিক্রমণ (break down) বিভবের কাছাকাছি বিভব ব্যবহার করেও ২—৩ মি.মি. এর অধিক বাহক-শূন্য গভীরতা অর্জন করা বড়ই কষ্টকর ব্যাপার। অথচ গামারশ্মির বর্ণালীবীক্ষণের জন্য আরো অধিকতর পুরুত্বের সন্ধায়ী প্রয়োজন।

১৯৬০ সালে মি. পেল (E.M. Pell) প্রথমে আয়ন-তাড়ন প্রক্রিয়ার (ion drifting process) পরীক্ষণমূলক প্রদর্শনী প্রদান করেন। এ আয়ন-তাড়ন প্রক্রিয়াই বিশালায়তন সক্রিয় এলাকার অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী নির্মাণের ব্যবহারিক পদ্ধতির যোগান দিয়েছে। মূলত প্রক্রিয়াটিতে প্রতিবিহিত পদার্থের এমন এক পুরু এলাকা সৃষ্টি করা হয় যেখানে গ্রাহক অপদ্রব্যের পরিমাণ দাতা দ্রব্যের পরিমাণকে যথাযথভাবে ভারসাম্য করে থাকে। উক্ত এলাকায় তখন খাঁটি বা সহজাত পদার্থের মত ধর্মাবলী থাকে। এটি এখন পৃষ্ঠদেশে ব্লকিং সংযোগ স্থাপনের মাধ্যমে আপতিত বিকিরণপাতে সৃষ্ট ইলেকট্রন-হোল সংগ্রহের উপযোগী মাধ্যম হিসেবে কাজ দিতে পারে। কৃস্টালটি জন্মানোর আগেই অর্ধপরিবাহীতে যথাযথ পরিমাণ অপদ্রব্য সাধারণভাবে সংযোগ করে এ প্রতিবিধান (compensation) সম্পাদন করা যায় না কেননা গ্রাহক ও দাতার মধ্যকার ভারসাম্য কখনোই যথাযথভাবে সঠিক হয় না। সুতরাং বস্তুটি সব সময়ই যে ধরনের অপদ্রব্যটি প্রবল হয় তার উপর ভিত্তি করে n-type বা p-type হয়ে থাকে ; তীব্রতাটুকু যত নগণ্যই হোক না কেন তাতে কিছু যায় আসে না !

২.২ আয়ন-তাড়িত সন্ধায়ী নির্মাণ (Ion-drifted detector fabrication)

২.২.১ আয়ন-তাড়ন প্রক্রিয়া (Ion-drift process) : প্রাপ্ত সর্বোচ্চ খাঁটি (pure) সিলিকন ও জার্মানিয়াম p-type হওয়ার দিকে ঝোঁকগ্রস্ত হয়ে থাকে ;

সর্বোচ্চ পরিশোধন (refining) প্রক্রিয়াও গ্রাহক অপদ্রব্যের প্রাধান্য রেখে যায়। তাই আকাঙ্ক্ষিত প্রতিবিধান সম্পাদনের জন্য দাতা পরমাণু সংযোগ করতে হয়। অ্যালকালি ধাতু যেমন: লিথিয়াম, সোডিয়াম ও পটাশিয়াম সিলিকন ও জার্মানিয়াম কেলাসে ল্যাটিস মধ্যবর্তীস্থলে দাতা (donor) গঠনে প্রবণ হয়। প্রদত্ত ইলেকট্রনটিকে উত্তেজিত করে পরিবাহী ব্যান্ডে ঠেলে দিলে যেসব আয়নিত দাতা পরমাণুর সৃষ্টি হয় সেগুলো উচ্চতর তাপমাত্রায় এমন পর্যাপ্ত চলিষ্ণু (mobile) হয় যে শক্তিশালী বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবাধীনে সেগুলোকে তাড়িয়ে নিয়ে যাওয়া যেতে পারে। উপরিলিখিত উপাদানের মধ্যে কেবল লিথিয়ামকেই পর্যাপ্ত ঘনত্বে সিলিকন বা জার্মানিয়ামে ব্যবহারিক প্রতিবিধানিক (compensating) অপদ্রব্যরূপে ঢুকানো চলে।

p-type কেলাসের কোনো এক পৃষ্ঠদেশ দিয়ে অতিরিক্ত লিথিয়াম ব্যাপনের দ্বারা নির্মাণ প্রক্রিয়াটি শুরু করা হয় যেন দাতা লিথিয়াম আদি গ্রাহকের (acceptor) চেয়ে সংখ্যায় বিশাল মাত্রায় ছাড়িয়ে যায়; ফলে সংশ্লিষ্ট পৃষ্ঠদেশের নিকটে একটি n-type অঞ্চল গড়ে উঠে। উদ্ভূত p-n জংশনকে তখন বিমুখী ঝোঁকগ্রস্ত করা হয় এবং সাথে কেলাসের তাপমাত্রাও উন্নীত করা হয় যাতে আয়নিত লিথিয়াম দাতা-সমূহের চলিষ্ণুতা বৃদ্ধি পায়। লিথিয়াম আয়নসমূহকে তখন বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র দ্বারা ধীরে টেনে p-type অঞ্চলে আনা হয়। সেখানে তাদের ঘনত্ব বৃদ্ধি পাবে এবং আদি গ্রাহক অপদ্রব্যের প্রায় সমান হবে। আয়ন-তাড়ন প্রক্রিয়ার এক উল্লেখযোগ্য বৈশিষ্ট্য এই যে স্বয়ংক্রিয়ভাবেই যথাযথ ক্ষতিপূরণ অবশ্যই ঘটে কেননা আয়ন-তাড়িত এলাকায় লিথিয়াম বণ্টন প্রতিটি বিন্দুতে সামগ্রিক স্থান-আধানকে বাহক শূন্য অবস্থায় পরিণত করতে চায়। সুতরাং তা দিয়ে একটি সাম্যাবস্থার প্রতিষ্ঠা ঘটে যাতে লিথিয়াম আয়ন p-type অঞ্চলে আরো দূরত্বে প্রবাহিত হতে থাকে। আয়ন-তাড়ন পদ্ধতিতে ৮ থেকে ১০ মিলিমিটার পর্যন্ত বিস্তৃত প্রতিবিহিত অঞ্চল লাভ করা যায়।

লিথিয়াম তাড়ন প্রক্রিয়ার পুঙ্খানুপুঙ্খ বিশ্লেষণে দেখা গেছে প্রবাহকালে উপস্থিত তাপীয়ভাবে উত্তেজিত ইলেক্ট্রন-হোল জোড়ার উপস্থিতি নিট স্থান আধানে অবদান রাখে এবং লিথিয়াম দাতা ও গ্রাহক অপদ্রব্যে যথাযথ প্রতিবিধানে ওলট-পালট আনয়ন করে। নির্মাণ প্রক্রিয়াটি তাই দুই ধাপে সম্পন্ন করা হয়; প্রাথমিক আয়ন-তাড়ন প্রক্রিয়ার পরই আসে অপেক্ষাকৃত দীর্ঘকালব্যাপী পরিষ্কারকরণ প্রক্রিয়া। দ্বিতীয় ধাপ চলাকালে তাপমাত্রা প্রথম ধাপের তুলনায় অনেক নিচে রাখা হয় যেন তাপীয়ভাবে উত্তেজিত বাহকসমূহ স্বল্পতর প্রভাব ফেলে এবং লিথিয়াম অণু ক্রমশ পুনর্বণ্টন সংঘটনের মাধ্যমে প্রায় পূর্ণ প্রতিবিধান লাভ ঘটে। এমতাবস্থায়

সন্ধায়ী চালনা তাপমাত্রা সর্বদাই পরিষ্করণ (clean up) তাপমাত্রার চেয়ে বেশ কম হওয়ায় অবশেষ আধান ভারসাম্যহীনতা ও অসম্পূর্ণ প্রতিবিধানের সম্ভাবনা থেকেই যায়। উদ্ভূত প্রভাব সন্ধায়ীর শক্তি পৃথককরণের উপর ক্ষতিকর হতে পারে কেননা কেলাসের কোথাও কোথাও প্রত্যাশিত পরিমাণের চেয়ে দুর্বলতর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র স্থাপিত হয়ে থাকে। সযত্ন নির্মাণকৌশল প্রয়োগে আয়ন-তাড়িত অঞ্চলে অপ্রতিবিহিত (uncompensated) অপদ্রব্যের পরিমাণ 10^9/(ঘন সে.মি.) এর নিচে রাখা যায়।

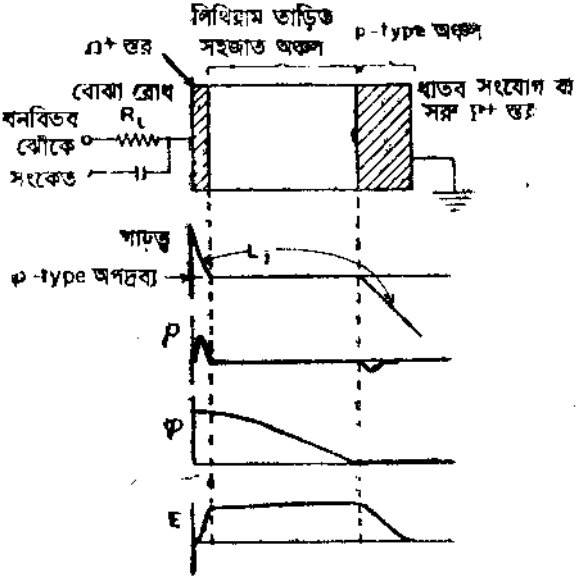
সিলিকন ও জার্মানিয়াম উভয় কেলাসেই লিথিয়াম আয়ন-তাড়নের সাহায্যে দরকারি সন্ধায়ী উৎপাদন করা যায়। লিথিয়াম আয়নের চলিষ্ণুতা (mobility) জার্মানিয়ামে অনেকগুণে বেশি এবং গৃহ তাপমাত্রায়ও পর্যাপ্ত পরিমাণ উচ্চ পর্যায়ে থেকে তাড়নকালে অর্জিত প্রতিবিহিত অবস্থা থেকে লিথিয়াম আয়নের আকাঙ্ক্ষিত পুনর্বণ্টনে সহায়তা করে। সুতরাং জার্মানিয়ামে আয়ন প্রবাহের পর তাৎক্ষণিক-ভাবে কেলাসের তাপমাত্রা আকস্মিক হ্রাস করে লিথিয়ামের প্রোফাইল (profile) রক্ষা করতে হবে। তাপমাত্রা হ্রাসটি তরল নাইট্রোজেনের তাপমাত্রায় (77°K) হওয়া দরকার। গৃহ তাপমাত্রায় সিলিকনে আয়ন চলিষ্ণুতা যথেষ্ট নিম্ন বিধায় শীতলীকরণ ছাড়াই লিথিয়াম তাড়িত সিলিকন সন্ধায়ীর ব্যবহার ও রক্ষণাবেক্ষণ করা চলে।

২.২.২ **P-I-N অবস্থান-অবস্থা (P-I-N configuration) :** তাড়ন প্রক্রিয়া একবার সম্পূর্ণ হয়ে গেলে উদ্ভূত সন্ধায়ীর সরলীকৃত অবস্থান-অবস্থা ২.১ চিত্রের ন্যায় হয়ে থাকে। কেলাসের যে পৃষ্ঠদেশ থেকে লিথিয়াম আয়ন-তাড়ন শুরু করা হয়েছিল তাতে বিদ্যমান অতিরিক্ত লিথিয়াম আয়ন একে n^+ স্তরে রূপান্তর করে এবং সংশ্লিষ্ট স্তরটিকে বৈদ্যুতিক সংযোগরূপে ব্যবহার করা যায়। অপর পাশের অপ্রতিবিহিত p-অঞ্চলকে ধাতব আস্তরণ দিয়ে ওহমিক সংযোগরূপে কাজ করানো হয়।

প্রতিবিহিত অঞ্চলে সৃষ্ট আধান বাহকের (প্রায়শই সহজাত বা i অঞ্চল বলা হয়) জীবনকাল উভয় সীমান্তের যে কোনোটিতে সংগ্রহের জন্য দরকারি সময়ের চেয়ে বহুগুণে বেশি বলে আধান সংগ্রহ বেশ ভাল হয়ে থাকে। তড়িৎ আধান দ্রুত সংগৃহীত হওয়া অতি বাঞ্ছনীয় ও আবশ্যকীয়। তাই বাহক অপচয় রোধের জন্য বেশ উচ্চ বিভব (500—4000 V) প্রযুক্ত হয়।

যেহেতু আদর্শগতভাবে কোনো নিট আধান i অঞ্চলে থাকে না তাই উদ্ভূত বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র আধান ঘনত্ব $\rho = 0$ এর জন্য সরল রামতলিক অবস্থান-অবস্থার ভিতর দিয়ে রৈখিকভাবে পরিবর্তিত হয় (চিত্র ২.১)। সুতরাং i অঞ্চল জুড়ে বিদ্যমান বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সুষম হবে। কেননা p^+ বা n^+ উভয় অঞ্চলের তুলনায়

প্রতিবিধিত পদার্থের রোধকত্ব বহুগুণে উচ্চতর। স্পষ্টতই সমুদয় প্রযুক্ত বিভবই i অঞ্চলে আবির্ভূত হয় এবং উভয় সীমান্তে খাড়াভাবে পতিত হয়ে শূন্যে পৌঁছে। সুতরাং i অঞ্চলের পরিমাণই সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকা নির্ধারণ করে থাকে এবং আধান বাহকের p-i এবং i-n সীমান্ত দিয়ে অতিপ্রয়াণ মূল সংকেত স্পন্দের উৎপত্তি ঘটায়।



চিত্র ২.১ : লিথিয়াম-তাড়িত p-i-n জংশন সন্ধায়ীর ভিত্তিমূলক অবস্থান-অবস্থা (configuration)। অপদ্রব্য ঘনত্ব, আধান ঘনত্ব (ρ), বৈদ্যুতিক বিভব ϕ এবং বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র E এর প্রোফাইল (profile) দেখানো হয়েছে।

সামতলিক জ্যামিতিতে ধ্রুবক বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের পরিমাণ হচ্ছে :

$$E = \frac{V}{d} \qquad (২.১)$$

যেখানে V হচ্ছে প্রযুক্ত বিভব এবং d হচ্ছে সহজাত (i) অঞ্চলের পুরুত্ব। এই সরল ফলাফলটি পূর্বাভাস করা হচ্ছে এ ধারণা থেকে যে লিথিয়াম আয়ন প্রতিবিধান এমন সম্পূর্ণরূপে হয়ে থাকে যেন নিট (net) কোনো আধানই i অঞ্চলে না থাকে। ব্যবহারিক সন্ধায়ীতে আদর্শ প্রতিবিধান থেকে সামান্য বিচ্যুতিই পর্যাপ্ত স্থান আধান ঢুকিয়ে সরলীকৃত মডেল দ্বারা পূর্বাভাসকৃত বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের আকার বিকৃত করে দিতে পারে।

সন্ধায়ী নির্মাণের সর্বাধিক সরাসরি উপায় অর্ধপরিবাহী ওয়াফারের এক পৃষ্ঠ-দেশ থেকে লিথিয়াম প্রবাহিত করা। বর্তমানের প্রযুক্তি ও কলাকৌশল এ ধরনের সামতলিক স্তরের চূড়ান্ত পুরুত্ব ১৫ থেকে ২০ মিলিমিটারে সীমিত রাখে, তদূর্ধ্বে তাড়ন প্রক্রিয়া চালানো সম্ভব হয় না। বৃহত্তর সক্রিয় এলাকার সন্ধায়ী সৃষ্টির জন্য অন্যান্য জ্যামিতিক গঠন বাছাই করা হয়ে থাকে যাতে বিশালতর পৃষ্ঠদেশে আয়ন-তাড়ন ঘটতে পারে। বেলনাকার (cylindrical) কেলাসের বাইরের পৃষ্ঠ থেকে লিথিয়াম আয়ন তাড়ন চালিয়ে সমাক্ষিক (coaxial) সন্ধায়ী নির্মাণ করা যায়। এরা হতে পারে উন্মুক্ত প্রান্তধারী যাতে p-type অন্তর্বস্তু (core) বেলনের সমগ্র অক্ষ জুড়ে বিরাজ করতে পারে বা একটি প্রান্তধারী (single ended) যাতে বাড়তি-ভাবে আয়ন তাড়ন চালানো হয় একপ্রান্তের পৃষ্ঠ থেকে। কোনো কোনো সমাক্ষিক বা পঞ্চপৃষ্ঠধারী অবস্থান-অবস্থায় ১৫০ ঘন সেন্টিমিটার (cm^3) পর্যন্ত সক্রিয় এলাকা বাস্তবায়নযোগ্য করা সম্ভব হয়েছে। সমাক্ষিক সন্ধায়ীর কেন্দ্রীয় অন্তর্বস্তু অপসারণ করে কূয়া-ধরনের সন্ধায়ীও নির্মাণ করা যায় যাতে কূয়ার ভিতর বিকি-রণ উৎসটি স্থাপন করে গণনা করলে আপেক্ষিকভাবে অনেক উচ্চ গণনা দক্ষতা অর্জন করা সম্ভব।

সমাক্ষিক জ্যামিতিতে সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকার সর্বত্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সুগম নয়। নিখুঁত প্রতিবিধান ক্ষেত্রের বেলায় এবং কোনো নিট স্থান আধানের অভাবে সহজাত i অঞ্চলস্থ r ব্যাসার্ধে যেখানে অন্তস্থ ব্যাসার্ধ r_1 এবং বহিস্থ ব্যাসার্ধ r_2 বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের শক্তি হচ্ছে :

$$E_{(r)} = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)} \qquad (২.২)$$

২.৩ আয়ন-তাড়িত সন্ধায়ীর মৌলিক বৈশিষ্ট্যাবলী (Fundamental characteristics of ion drifted detectors)

২.৩.১ তুলনামূলক ধর্মাবলী (Comparative properties) : আয়ন-তাড়িত সন্ধা-য়ীর ধর্ম নানা বিষয়েই পৃষ্ঠবাঁধ এবং ব্যাপ্ত জংশন সন্ধায়ীর ধর্মের সাথে অভিন্ন। যেহেতু কেলাসে সংযোজিত প্রতিবিধানকারী (compensating) অপদ্রব্যের ঘনত্ব অত্যন্ত স্বল্প হয়ে থাকে তাই অর্ধপরিবাহী পদার্থের মূল বৈশিষ্ট্যাদি যেমন একজোড়া হোল-ইলেকট্রন গঠনে প্রয়োজনীয় শক্তি, ফানো গুণাঙ্কের পরিমাণ বা কেলাস চ্যানেলিংয়ের প্রভাব উল্লেখযোগ্যভাবে প্রভাবিত হয় না। তবে অন্যান্য ধর্মাবলী যেমন: সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকা, ধারকত্ব (capacitance) এবং তড়িৎ স্পন্দের উত্থানকাল (rise time) আয়ন-তাড়িত সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে উল্লেখযোগ্যভাবে পরিবর্তিত হয়ে থাকে। সক্রিয় এলাকাটি এককভাবে প্রতিবিহিত অঞ্চলের প্রস্থ দ্বারা নিরূপিত

হয় এবং আয়ন প্রবাহ প্রক্রিয়া শেষে এর মাত্রা (dimension) নির্ধারিত হয়ে থাকে। p-n জংশন সন্ধায়ীর ন্যায় বিভব প্রয়োগে এদের বাহক রিক্ত অঞ্চলের প্রশস্ততা তেমন বদলায় না এবং এদের ধারকত্বও প্রায় ধ্রুবক থাকে। যেহেতু সক্রিয় এলাকা নমুনা-গতভাবেই পৃষ্ঠবাঁধ বা ব্যাপ্ত জংশন সন্ধায়ীর তুলনায় বহুগুণে বিশালতর হয় তাই কোনো প্রযুক্ত বিভব দ্বারা সৃষ্ট গড় বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র উল্লেখযোগ্যভাবে স্বল্পতর হয়ে থাকে। সিলিকন কেলাসে লিথিয়াম আয়ন-তাড়নে সৃষ্ট সন্ধায়ীকে Si(Li) বলে আখ্যায়িত করা হয়; এরা ইলেকট্রন ও এক্স-রে বর্ণালীবীক্ষণে অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ সন্ধায়ী। লিথিয়াম আয়ন তাড়িত জার্মানিয়াম সন্ধায়ী (সংক্ষেপে Ge(Li)) গামা বর্ণালীবীক্ষণে অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ সন্ধায়ী।

২.৩.২ রৈখিকতা ও ফাঁদ (Linearity and trapping) : অধিকাংশ প্রয়োগের ক্ষেত্রে সরলীকৃত অনুমান এই যে Ge(Li) সন্ধায়ী থেকে উদ্ভূত তড়িৎ স্পন্দ উচ্চতা বিকিরণ কর্তৃক সন্ধায়ীতে জমানো (deposited) শক্তির অনুপাতে পরিবর্তিত হয়। এমনটি তখনই ঘটবে যখন প্রতিটি ইলেকট্রন-হোল জোড়া উৎপাদনে ব্যয়িত শক্তি সকল ক্ষেত্রে একই হয় এবং উৎপাদিত আধান বাহকের সমুদয়ই শতকরা একশত ভাগ দক্ষতায় সংগৃহীত হয়। Ge(Li) সন্ধায়ী দ্বারা সযত্ন পরিমাপনে 0.5—10.0 MeV পর্যন্ত শক্তির গামারশ্মির ক্ষেত্রে 46 ppm (parts per million) এর চেয়ে অধিকতর ভাল রৈখিকতা পাওয়া গেছে।

তড়িৎ স্পন্দ উচ্চতায় অরৈখিকতার যেসব কারণ রয়েছে তন্মধ্যে প্রধান হচ্ছে আধান বাহকের ফাঁদে আটকা পড়া ও পুনর্মিলনজনিত অপচয়। আধানের যে অংশ হারিয়ে যায় তা শক্তির সাথে পরিবর্তিত হয় কেননা শক্তি-নির্ভর বিদারণ দূরত্ব বা গড় মিথস্ক্রিয়ার অবস্থান আধান সংগ্রহের উপর প্রভাব ফেলে। মনে রাখতে হবে যে ফাঁদ দু'শ্রেণির হয়, যথা: অগভীর (shallow) ফাঁদ যা ব্যান্ড গ্যাপের শীর্ষে থাকে আর গভীর ফাঁদ যা ব্যান্ড গ্যাপের প্রায় তলদেশের কাছে থাকে। অল্প শক্তি পেলেই অগভীর ফাঁদ থেকে বাহক মুক্ত হয়ে যায় বলে এদের আয়ু সচরাচর কম হয়। ফাঁদে আবদ্ধ বাহকের অবমুক্তি সন্ধায়ী কর্তৃক উৎপাদিত তড়িৎ স্পন্দে গুরুত্বপূর্ণ প্রভাব ফেলে; শক্তি পৃথকীকরণের উপরও ছাপ ফেলে।

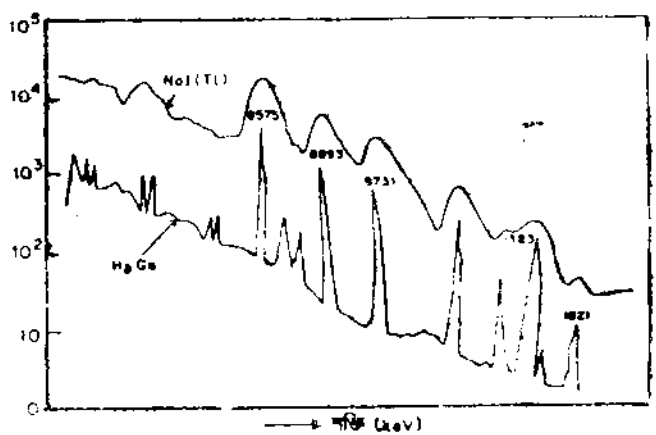
২.৩.৩ পৃষ্ঠদেশস্থ অসক্রিয় স্তর (Surface dead layer) : যে কোনো Ge(Li) সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকাটি হচ্ছে সহজাত অঞ্চল যেখানে আয়ন তাড়নের দ্বারা অপদ্রব্যের যথাযথ প্রতিবিধান সাধিত হয়েছে। ইলেকট্রন ও আধানযুক্ত কণিকা দ্বারা যথার্থ পরিমাপনে দেখা গেছে যে পৃষ্ঠদেশে উল্লেখযোগ্য পরিমাণ অসক্রিয় স্থান বিদ্যমান থাকে। সময়ের সাথে নিম্ন শক্তির গামারশ্মি সন্ধান দক্ষতায় উল্লেখযোগ্য পরিবর্তন ঘটে কারণ অসক্রিয় স্তরের পুরুত্ব পরিবর্তিত হয়ে চলে।

২.৪ Ge(Li) সন্ধায়ীর চালনা বৈশিষ্ট্য

২.৪.১ সন্ধায়ীর হিমাধার ও ডিউয়ার (Detector cryostat and dewar) : লিথিয়াম-তাড়িত জার্মানিয়াম সন্ধায়ীকে সর্বদাই হ্রাসকৃত তাপমাত্রায় চালনা ও রক্ষণাবেক্ষণ করতে হবে। বাস্তবে তাই সকল Ge(Li) সন্ধায়ীকে বায়ুশূন্য হিমাধারে আবদ্ধ রাখা হয়। হিমাধারটি থেকে জার্মানিয়াম কেলাসে একটি দণ্ডের সাহায্যে তাপীয় সংযোগ রাখা হয়। হিমাধারে বা ডিউয়ারে তরল নাইট্রোজেন 77°K তাপমাত্রায় রাখা থাকে ; এর ধারণ ক্ষমতা প্রায় 20 লিটারের মতো। সন্ধায়ীর তুলনায় ডিউয়ারের আকার, আয়তন ও ওজন বহুগুণে বড় বিধায় এর প্রয়োগ ও নড়াচড়া অত্যন্ত সীমিত। কেলাসের তাপীয় স্বাতন্ত্রীকরণের (isolation) জন্য দরকার বায়ুশূন্য বেষ্টনীর। তাই সচরাচর একে বায়ুশূন্য অবস্থায় সীল করে দেয়া হয়। স্বল্প শক্তির বিকিরণের জন্য প্রবেশ জানালা বিশেষ ধরনের হওয়া দরকার।

২.৪.২ শক্তি পৃথকীকরণ (Energy resolution) : জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর প্রবল ও প্রধান বৈশিষ্ট্য হলো এর চমৎকার শক্তি পৃথককরণ ক্ষমতা। ২.২ চিত্রে NaI(Tl) ও Ge(Li) সন্ধায়ীতে আপতিত অভিন্ন শক্তির গামারশ্মির বর্ণালীর তুলনামূলক তড়িৎ স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালী প্রদর্শন করা হলো। শক্তি পৃথককরণে Ge(Li) সন্ধায়ীর যে প্রাধান্য রয়েছে তা ২.২ চিত্র থেকে স্পষ্টত বুঝা যায়। খুব কাছাকাছি শক্তির গামা উৎসের মিশ্রণ থেকে আলাদা করা যায় Ge(Li) সন্ধায়ী

চিত্র ২.২ : NaI(Tl) সিন্টিলেটর ও Ge(Li) অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী দ্বারা গৃহীত তুলনামূলক তড়িৎ স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালী। উৎসটি হচ্ছে গামা উৎসারী ^{108m}Ag ও ^{110m}Ag ; শক্তি স্পন্দনগুলো keV তে চিহ্নিত হবে।



দ্বারা বর্ণালী রেকর্ড করে। ২.২ চিত্র থেকে আরো দেখা যায় যে NaI(Tl) সন্ধায়ী পৃথক করতে পারে না এমন বহু ঘন সন্নিবিষ্ট গামারশ্মির শক্তি Ge(Li) অবলীলাক্রমে পৃথক পৃথক করে দেখাতে পারে। বাস্তবে গামারশ্মির জটিল বর্ণালীবীক্ষণে আজকাল সর্বদাই উচ্চ বিশুদ্ধ জার্মানিয়াম (HpGe) সন্ধায়ী ব্যবহার করা হয়ে থাকে।

কোনো Ge(Li) সন্ধায়ীতে অর্জিত সর্বসমেত শক্তি পৃথককরণ স্বাভাবিকভাবে তিনটি উপাদান দ্বারা নিরূপিত হয়ে থাকে ; যথা :

—আধান বাহকের সংখ্যায় সহজাত পরিসংখ্যানিক বিস্তৃতি,

—আধান সংগ্রহের দক্ষতায় পরিবর্তন, এবং

—ইলেকট্রনিক নয়েজের অবদান।

উপরিউক্ত কারণগুলির কোনটি প্রবল হবে তা বিকিরণের শক্তি এবং সন্ধায়ীর আকার ও গুণের উপর নির্ভরশীল। বর্ণালীর কোনো একটি নমুনাগত স্পন্দশৃঙ্গের সর্বোচ্চ উচ্চতার অর্ধেক উচ্চতায় বিদ্যমান পূর্ণ বিস্তার, W_t সমশক্তির গামারশ্মির জন্য হচ্ছে :

$$W_t^2 = W_D^2 + W_x^2 + W_e^2 \qquad (২.৩)$$

যেখানে ডান পার্শ্বস্থ W এর মান হচ্ছে স্পন্দশৃঙ্গের বিস্তার (width) যথাক্রমে বাহকের পরিসংখ্যানের জন্য, তড়িৎ আধান সংগ্রহের জন্য এবং ইলেকট্রনিক নয়েজের কারণে। তন্মধ্যে প্রথমটি (W_D^2) সৃষ্ট আধান বাহকের সংখ্যায় সহজাত পরিসংখ্যানিক উঠানামার প্রতিনিধিত্ব করে ; এর মান

$$W_D^2 = (2.35)^2 F \in E \qquad (২.৪)$$

যেখানে F হচ্ছে ফানো গুণাঙ্ক, $\in$ হচ্ছে একজোড়া ইলেকট্রন-হোল সৃজনে ব্যয়িত শক্তি এবং E হচ্ছে গামা বিকিরণের শক্তি। দ্বিতীয় পদ W_x^2 হচ্ছে অসম্পূর্ণ আধান সংগ্রহের অবদান ; বিশালায়তন সন্ধায়ী ও গড় স্বল্প বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের বেলায় এটি গুরুত্বপূর্ণ হয়ে থাকে। প্রযুক্ত বিভব পরিবর্তন করে তদনুসারে প্রতিটি প্রযুক্ত বিভব মানে 'FWHM' পরীক্ষণের মাধ্যমে পরিমাপ করে এর পরিমাণ নিরূপণ করা যায়। ধারণা করা হয় যে প্রযুক্ত বিভবের মান অসীম পরিমাণে বড় করা গেলে অসম্পূর্ণ আধান সংগ্রহের প্রভাব উপেক্ষণীয় পর্যায়ে হ্রাস করা সম্ভব হতো। সন্ধায়ীর পরবর্তী ইলেকট্রনিক উপাদানের প্রভাবে সৃষ্ট বিস্তৃতিটুকু তৃতীয় গুণাঙ্ক W_e^2 দ্বারা প্রতিনিধিত্ব করানো হয়েছে।

২.৩ সমীকরণে বিবৃত প্রথম পদটি আধান উৎপাদনের পরিসংখ্যান দ্বারা নিরূপিত হয়ে থাকে বিধায় সকল জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে এক ও অভিন্ন হয়ে

থাকে। সুতরাং বিভিন্ন জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর মধ্যে শক্তি পৃথককরণের বিভিন্নতা আধান সংগ্রহের দক্ষতা ও নয়েজ এবং ইলেকট্রনিক্যাল অস্থিতিশীলতার পার্থক্যের জন্য ঘটে থাকে। স্বল্প সক্রিয় আয়তনের সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে আধান সংগ্রহ সর্বাধিক সুষম হতে পারে। বিশালায়তন সন্ধায়ী এর সহজাত উচ্চ ধারকত্বের জন্য বৈশিষ্ট্য-গতভাবেই নয়েজ প্রবণ হয় এবং স্বল্প শক্তি পৃথককরণ বৈশিষ্ট্য প্রদর্শন করে।

২.৪.৩ তড়িৎ স্পন্দের আকার এবং সময়গত ধর্মাবলী (Pulse shape and timing properties)

২.৪.৩.১ তড়িৎ আধান সংগ্রহ প্রক্রিয়া ঃ Ge(Li) সন্ধায়ীর সংকেত স্পন্দের আকারের পুঙ্খানুপুঙ্খরূপ জানা বিভিন্ন কারণে গুরুত্ববহ। আদর্শ মানের স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালীবীক্ষণে নিক্ষেপী (ballistic) ঘাটতিজনিত পৃথককরণ অপচয় পরিহারের জন্য স্পন্দ প্রক্রিয়াকারী ইলেকট্রনিক্সের আকারদাত্রী সময়কে (shaping time) সন্ধায়ী থেকে মোকাবিলা করার সম্ভাব্য দীর্ঘতম সময়ের চেয়ে অধিকতর হওয়া আবশ্যকীয়। সময় পৃথককরণের নানাবিধ পদ্ধতি বিবেচনাকালে স্পন্দের উত্থান কাল ও অগ্রসরমান ধারের (edge) পুঙ্খানুপুঙ্খ আকার জানা গুরুত্বপূর্ণ। Ge(Li) সন্ধায়ী থেকে প্রাপ্ত চূড়ান্ত সময় পৃথককরণ স্পন্দের সর্বসমেত গড় উত্থানকাল ও সংঘটন থেকে সংঘটনে স্পন্দের আকারের গুরুত্বপূর্ণ পরিবর্তন এ উভয়ের উপরই ক্রান্তিগতভাবে নির্ভরশীল। সন্ধায়ী কর্তৃক উৎপাদিত সর্বোচ্চ উত্থানকালের তুলনায় পরিমাপনী ইলেকট্রনিক্সের তুল্য বর্তনী দীর্ঘ সময় প্রদান করে ধরে নিলে সংকেত স্পন্দের অগ্রধার (leading edge) সন্ধায়ীস্থ আধান সংগ্রহের বিশেষ তথ্য দ্বারা নির্ণীত হয়ে থাকে। যেহেতু সম্ভাব্য স্বল্পতর উত্থানকালই অধিকতর শ্রেয় তাই যে সকল অবস্থাধীনে ন্যূনতম (minimum) সময়ে আধান সংগ্রহ ঘটে তাদেরই বাছাই করে নেয়া হয়। পরীক্ষণে দেখা গেছে নিম্নমানের বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের বেলায় বেগ রৈখিকভাবে বেড়ে চলে; এ দ্বারা হোল ও ইলেকট্রন চলিষ্ণুতার ধ্রুব মানের কথাই স্পষ্ট হয়। পর্যাপ্ত উচ্চ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের বেলায় বেগ তেমন না বেড়ে সংপৃক্ত হয়ে যায়। জার্মানিয়ামে 77°K তাপমাত্রায় এ সংপৃক্ত তাড়ন বেগ প্রায় 10^5 মিটার প্রতি সেকেন্ডে গিয়ে দাঁড়ায় যখন বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র প্রায় 10^5 ভোল্ট প্রতি মিটারে থাকে। হোলের জন্যও সংপৃক্ত বেগ প্রায় একই রকম তবে ন্যূনতম ক্ষেত্র 3×10^5 ভোল্ট প্রতি মিটারে প্রয়োজন হয়।

Ge(Li) সন্ধায়ীর চূড়ান্ত সময় পৃথককরণ দুটি কারণে সীমিত হয়ে থাকে — এর একটি হচ্ছে আধান সংগ্রহ প্রক্রিয়াটি সহজাতভাবেই ধীরগামী। এমনকি সংপৃক্ত তাড়ন বেগেও আধান বাহকের ১ সেন্টিমিটার (যা প্রায় সন্ধায়ীর পুরুত্বের সমান) দূরত্ব অতিক্রম করতে সময় লাগে প্রায় 100×10^{-9} সে.। বৈশিষ্ট্যগত স্পন্দের উত্থানকালও প্রায় একই পরিমাণ হয়ে থাকে। দ্রুতগামী সন্ধায়ীর স্পন্দ উত্থানকালের

চেয়ে এ উত্থানকাল অনেক দীর্ঘ (যেমন, জৈব সিন্টিলেটর)। উত্থানকাল সীমিত-করণের দ্বিতীয় কারণটি সময়গত ধর্মাবলীকে আরো বেশি খারাপ করে দেয়। সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকায় ইলেকট্রন হোলের সৃজনস্থলের উপর নির্ভর করে এক সংঘটন থেকে অন্যটিতে স্পন্দের উত্থানকালের আকার উল্লেখযোগ্যভাবে পরিবর্তিত হয়ে থাকে। সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকাটি সুষমরূপে বিকিরণপাতগ্রস্ত হলে হোল-ইলেকট্রন সৃজনস্থল এলোপাতাড়ি বণ্টিত (distributed) হয়ে থাকে এবং উৎপাদ স্পন্দসমূহ তাদের অগ্রধারের আকারের বিরাট পরিবর্তন প্রদর্শন করে। এ পরিবর্তন-শীল স্পন্দ-আকার সময়গত (timing) সংকেত আহরণ পদ্ধতিতে অসুবিধার সৃষ্টি করে বলে অসুবিধা ন্যূনতম করার জন্য বিশেষ প্রযুক্তির আশ্রয় নিতে হয়।

২.৪.৩.২ তড়িৎ স্পন্দ আকারের মডেল (Models for pulse shape) : অন্যান্য সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে যেমন সংকেত বাহকসমূহের বেশ জায়গা জুড়ে সংগ্রহ করতে হয় Ge(Li) সন্ধায়ীর ক্ষেত্রেও তাই করতে হয়। তবে মনে রাখতে হবে যে Ge(Li)-এর স্পন্দের অগ্রধারের আকার এর সক্রিয় এলাকার যে স্থলে বাহক সৃষ্টি হয় তার উপর নির্ভর করে। সরলতম সংঘটন হিসেবে কোনো একটি হ্রস্ব যাত্রা পরিসরের কণিকার কথা বলা যায় যা সমুদয় ইলেকট্রন হোল জোড়া সন্ধায়ীর একটি বিন্দুতেই সৃষ্টি করে থাকে। সৃষ্টি স্থলটি সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকার অভ্যন্তরে অবস্থিত হলে হোল ও ইলেকট্রনের জন্য অদ্বিতীয় এবং পৃথক পৃথক সংগ্রহকাল লাগবে কেননা প্রতিটি বাহক প্রজাতি সংগ্রহের আগে নির্ধারিত দূরত্ব অতিক্রম করবে। যদি মিথস্ক্রিয়াস্থলটি সক্রিয় এলাকার উভয় প্রান্তের যে কোনো এক প্রান্তে ঘটে তাহলে পর্যবেক্ষিত স্পন্দের উত্থান (rise) প্রাথমিকভাবে এক ধরনের আধান বাহকের গতির জন্য হবে। যেসব তড়িৎ আধানযুক্ত কণিকার যাত্রা পরিসর সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকার সাথে তুলনীয় তাদের ক্ষেত্রে ইলেকট্রন ও হোল সৃজনস্থলের বণ্টন অনুযায়ী আধান সংগ্রহকালেরও বণ্টন ঘটবে। সংঘটন থেকে সংঘটনান্তরে কণিকার ট্র্যাকের দিকস্থিতি (orientation) পরিবর্তিত হলে স্পন্দ উত্থানকালে অতিরিক্ত পরিবর্তন সংযুক্ত হবে।

উৎপাদ তড়িৎ স্পন্দের অগ্রধারের আকারের বিশ্লেষণ ইতোপূর্বে প্রথম খণ্ডে পঞ্চম অধ্যায়ে আয়ন প্রকোষ্ঠের তড়িৎ স্পন্দের ক্ষেত্রে প্রদত্ত বিশ্লেষণের মতোই অনেকটা ; তাই এক্ষেত্রেও তা খাটে। তবে একটি অধিক গুরুত্বপূর্ণ পার্থক্য এই যে অর্ধপরিবাহীর ক্ষেত্রে ধন-আধান ও ঋণ-আধান বাহকদ্বয়ের (হোল ও ইলেকট্রন) চলিষ্ণুতা প্রায় একই কিন্তু গ্যাসের ক্ষেত্রে ধন-আধানের গতি মুক্ত ইলেকট্রনের চেয়ে বহুগুণে স্বল্প। যথেষ্ট অনুমান (assumption) দ্বারা সরলীকরণের মাধ্যমে

একটি সাধারণ Ge(Li) সন্ধায়ীর অবস্থান-অবস্থায় উৎপাদ স্পন্দের বিশ্লেষণ নির্ভর রাশি (analytical expression) আহরণ করা যায়। সরাসরি ধরে নেয়া অনুমানগুলির কতিপয় নিম্নরূপে বর্ণনা করা হলো :

—সমুদয় আধান বাহক সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকার নির্ধারিত বিন্দুতে সৃষ্টি হয় ; এ ধারণা মোটেই বাস্তবসম্মত নয়।

—আধান বাহকের ফাঁদে পড়া এবং ফাঁদমুক্ত হওয়া উপেক্ষণীয়।

—সমুদয় আধান বাহক সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকায় উৎপন্ন হয় যেখানে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের মান সর্বোচ্চ আশা করা হয়।

—সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকায় বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র এমন উচ্চ যে ইলেকট্রন ও হোল উভয়ের তাড়ন বেগেরই সংপৃক্তি ঘটে। সমাক্ষিক জ্যামিতির (coaxial geometry) ক্ষেত্রে এ নিষেধাজ্ঞা পালন করা সর্বাধিক কঠিন কেননা এ অবস্থায় সন্ধায়ীর বাহ্য পৃষ্ঠে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সর্বনিম্ন হয়ে থাকে।

উপরিউক্ত সরলীকরণ ধারণাগুলির পরিপ্রেক্ষিতে দুটি অপেক্ষাকৃত সরল জ্যামিতিক অবস্থান-অবস্থার জন্য প্রত্যাশিত স্পন্দের আকারের বিশ্লেষণ নির্ভর রাশি পাওয়া যেতে পারে। যথা : (১) সামতলিক (planar) সন্ধায়ী যার সর্বত্র বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সুষম থাকে ; এবং (২) সমাক্ষিক সন্ধায়ী যার অক্ষ (axis) থেকে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র ব্যাসার্ধগত দূরত্বের উল্টানুপাতে (inversely) পরিবর্তিত হয়ে থাকে।

২.৪.৩.২.১ সামতলিক জ্যামিতির ক্ষেত্রে স্পন্দের আকার : সামতলিক জ্যামিতির সন্ধায়ীর জন্য সমান্তরালপাত আয়ন সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে ব্যবহৃত বিশ্লেষণটি কাজে লাগানো যায়। d পুরুত্বের একটি সামতলিক সন্ধায়ীর n-type অঞ্চল থেকে x দূরত্বে সংঘটিত মিথস্ক্রিয়া থেকে প্রত্যাশিত স্পন্দের আকার হবে :

$$Q(t) = q_0 \left[\frac{x}{d} \left\{ \frac{t - (t - t_e)\, U(t - t_e)}{t_e} \right\} + \frac{d - x}{d} \left\{ \frac{t - (t - t_h)\, U(t - t_h)}{t_h} \right\} \right] \qquad (২.৫)$$

যেখানে, $q_0 =$ সৃষ্ট মোট আধান (যে কোনো ধর্মের)

$= n_0 e$, যেখানে n_0 হচ্ছে ইলেকট্রন-হোল জোড়ার সংখ্যা।

$$U(y) = \text{Unit step function} = \begin{cases} 1, & y > 0 \\ 0, & y \leq 0 \end{cases}$$

t_e = ইলেকট্রন সংগ্রহের কাল = $\frac{x}{v_e}$; v_e হচ্ছে ইলেকট্রনের সংপৃক্ত বেগ।

t_h = হোল সংগ্রহের সময়কাল = $\frac{d-x}{v_h}$, v_h হচ্ছে হোলের সংপৃক্ত বেগ।

সমীকরণ (২.৫) কে চারটি সম্ভাব্য সময় ডোমেইনে (time domain) ভাগ করা যায়। যথা :

যখন হোল ও ইলেকট্রন উভয়ই প্রবাহিত হয় ($t<t_h$ ও $t<t_e$) :

তখন $$Q(t)=q_0\left[\frac{v_e}{d}t+\frac{v_h}{d}t\right]$$

যদি ইলেকট্রন সংগৃহীত হওয়ার পরেও হোল প্রবাহিত হতে থাকে ($t_e<t<t_h$) :

তখন $$Q(t)=q_0\left[\frac{x}{d}+\frac{v_h}{d}t\right]$$

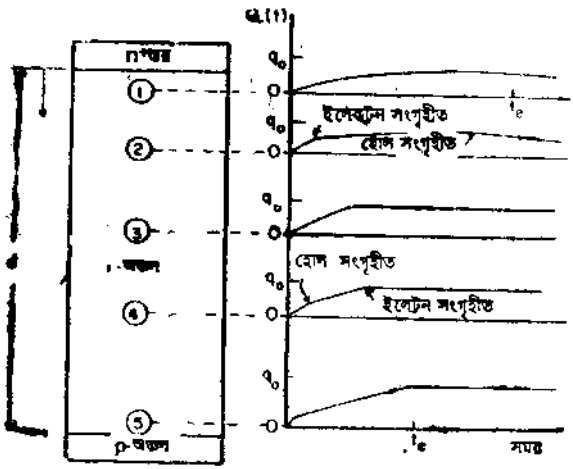
যদি হোল সংগ্রহের পরেও ইলেকট্রন প্রবাহিত হয়ে চলে ($t_h<t<t_e$) :

$$Q(t)=q_0\left[\frac{v_e}{d}t+\frac{(d-x)}{d}\right]$$

হোল ও ইলেকট্রন উভয়ই সংগ্রহের পরে ($t>t_h$ ও $t>t_e$) :

$$Q(t)=q_0$$

২.৩ চিত্রে x এর বিভিন্ন মানের জন্য স্পন্দের আকার দেখানো হলো।



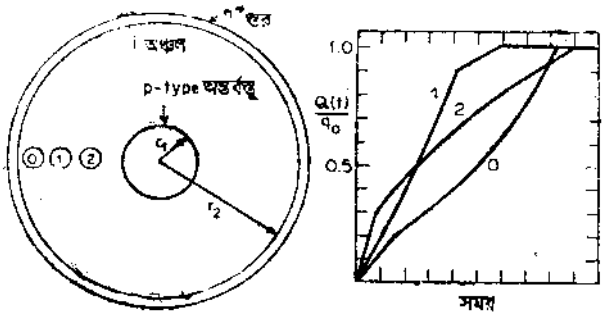
চিত্র ২.৩ : i-অঞ্চলের বিভিন্ন মিথস্ক্রিয়াস্থলের জন্য উৎপাদ স্পন্দ Q(t) এর অগ্রধারের আকার (সমীকরণ ২.৫ থেকে)। সমুদয় স্পন্দের প্রারম্ভিক গতি একই থাকে যখন হোল ও ইলেকট্রন উভয়েই প্রবাহিত হয়।

২.৪.৩.২.২ সমাক্ষিক জ্যামিতির (Coaxial geometry) ক্ষেত্রে স্পন্দের আকার : অভ্যন্তরীণ r_1 ব্যাসার্ধ ও বাহ্যিক r_2 ব্যাসার্ধের একটি যথাযথ সমাক্ষিক সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে আদি স্পন্দটির উত্থান আকার হচ্ছে :

$$Q(t) = \frac{q_0}{\ln(r_2/r_1)}\left[\ln\left(1+\frac{v_e t}{r_0}\right) - \ln\left(1-\frac{v_h t}{r_0}\right)\right] \qquad (২.৬)$$

যেখানে r_0 হচ্ছে মিথস্ক্রিয়াস্থলের ব্যাসার্ধ ।

সমীকরণ (২.৬) শুধু প্রথম সময় ডোমেইনেই কার্যকর যখন হোল এবং ইলেকট্রন উভয়েই প্রবাহমান থাকে। ইলেকট্রন অথবা হোল সংগৃহীত হওয়ার পর তৃতীয় বন্ধনীর ভিতরের প্রথম এবং দ্বিতীয় পদ ধ্রুবক হয়ে দাঁড়ায় । ইলেকট্রন ও হোল উভয়েরই সংগ্রহান্তে $Q(t) = q_0$ হয় । বিভিন্ন মিথস্ক্রিয়ার ব্যাসার্ধের জন্য এ স্পন্দের আকারের প্লট ২.৪ চিত্রে দেখানো হলো ।



চিত্র ২.৪ : সমাক্ষিক প্রবাহমান সন্ধায়ীর উৎপাদ স্পন্দের অগ্রধার। তিনটি ভিন্ন ভিন্ন মিথস্ক্রিয়ার স্থল 0, 1 ও 2 দ্বারা নির্দেশ করা হয়েছে।

সমাক্ষিক সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে কার্যকর উত্থানকালের পরিবর্তন সামতলিক সন্ধায়ীর ক্ষেত্রের চেয়ে বিশালতর হতে পারে ।

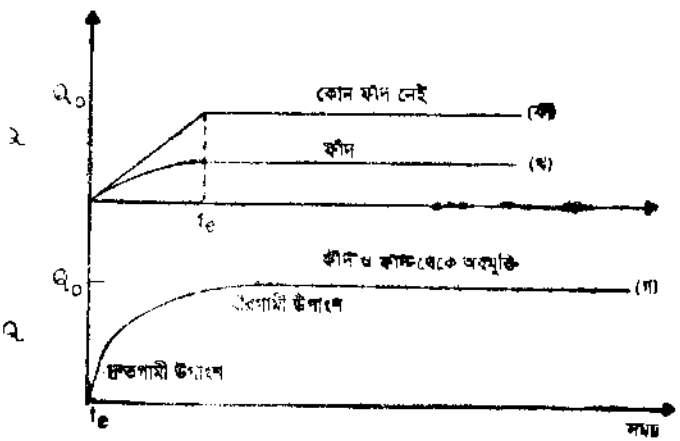
২.৪.৩.২.৩ আধান বাহকের ফাঁদে আবদ্ধ হওয়া ও ফাঁদ মুক্ত হওয়ার প্রভাব (Effects of trapping and detrapping of charge carriers) : বিষয়টিকে সরলীকরণের স্বার্থে ধরা যাক যে সমুদয় ইলেকট্রন-হোল জোড়া সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকার কোনো এক সীমান্তের নিকট সৃষ্ট হচ্ছে। এমতাবস্থায় সংকেত স্পন্দটি বিপরীত সীমান্তে কোনো একটি প্রজাতির আধান বাহকের সংগ্রহের উপর নির্ভরশীল । সামতলিক সন্ধায়ীর p-i সীমান্তে বাহক উৎপাদিত হলে (২.৫) সমীকরণে $x = d$ বসানো যায় ; সমীকরণটি তখন দাঁড়ায় :

$$Q(t) = \begin{cases} q_0 \dfrac{t}{t_e} & (t < t_e) \\ q_0 & t > t_e \end{cases} \qquad (২.৭)$$

এবং সরল রৈখিক স্পন্দ উত্থান সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকা বা i-অঞ্চল দিয়ে ইলেকট্রন প্রবাহের দরুন উৎপন্ন হয়ে থাকে। এখন এ অঞ্চল জুড়ে যদি ইলেকট্রন ফাঁদ সুষম গাঢ়ত্বে বিদ্যমান থাকে তাহলে অস্থায়ীভাবে হলেও কিছু তড়িৎ আধানের অপচয় ঘটবে এবং উৎপাদ স্পন্দে কোনো অবদান রাখবে না। যদি কখনোই অবমুক্তি না ঘটে তাহলে এগুলি স্থায়ীভাবে হারিয়ে যাবে এবং উৎপাদ স্পন্দটির রূপ হবে :

$$Q(t) = \begin{cases} \dfrac{q_0 \tau_T}{t_e}\left(1 - e^{-t/\tau_T}\right) & (t \leqslant t_e) \\ \dfrac{q_0 \tau_T}{t_e}\left(1 - e^{-t_e/\tau_T}\right) & (t > t_e) \end{cases} \qquad (২.৮)$$

যেখানে τ_T হচ্ছে ইলেকট্রনের গড় মুক্ত তাড়নকাল। স্থায়ী ফাঁদে বন্দী হলে স্পন্দ উত্থান আকারে বক্রতা আসে এবং বিস্তার কৃশ হয়ে পড়ে (চিত্র ২.৫)।



চিত্র ২.৫ : সামভলিক সন্ধায়ীর একপ্রান্তে i-অঞ্চলে মিথস্ক্রিয়ার স্পন্দ আকার। (ক) কোনো ফাঁদ নেই, (খ) স্থায়ী ফাঁদ রয়েছে, (গ) ফাঁদ আছে তবে ধীরে ফাঁদ মুক্ত হচ্ছে।

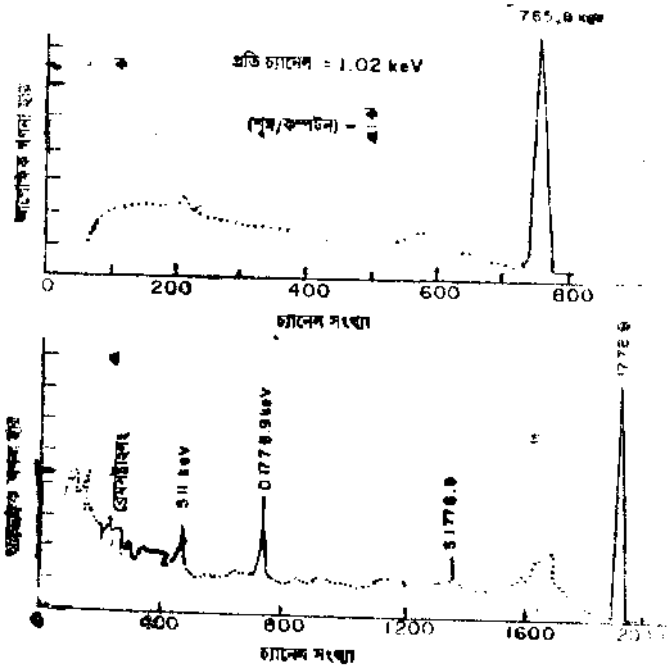
২.৫ Ge(Li) সন্ধায়ী ব্যবহার করে গামারশ্মির বর্ণালীবীক্ষণ (Gamma-ray spectroscopy with Ge(Li) detectors)

কয়েকশত keV এর অধিক শক্তির গামারশ্মি পরিমাপনে দুই ধরনের সন্ধায়ী প্রধান (major) গুরুত্ববহ, যথা : (১) অজৈব সিন্টিলেটর যার মধ্যে NaI(Tl) সর্বাধিক জনপ্রিয়, এবং (২) জার্মানিয়াম অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী যার মধ্যে Ge(Li) ও HpGe প্রধান। অন্যান্য ধর্মাবলীর মধ্যে সন্ধায়ীর সন্ধান দক্ষতা ও শক্তি পৃথককরণ সন্ধায়ী বাছাইয়ে গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা পালন করে। সোডিয়াম আয়োডাইড সিন্টিলেটরের সুবিধাগুলো হচ্ছে—(১) এটি বিশালায়তনে তৈরি করা যায়, (২) এর উপাদানের ঘনত্ব উচ্চ এবং পারমাণবিক সংখ্যাও উচ্চ, এবং (৩) গামারশ্মির মিথস্ক্রিয়ার সম্ভাবনা অনেক বেশি। অতএব এ কারণে সোডিয়াম আয়োডাইডের সন্ধান দক্ষতা বেশ উঁচু। কিন্তু এর শক্তি পৃথককরণ জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর তুলনায় অনেক কম (চিত্র ২.২)। উত্তম মানের জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর শক্তি পৃথককরণ (resolution) শতকরা এক ভাগেরও কম হয়ে থাকে অথচ সোডিয়াম আয়োডাইড সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে শতকরা ৫—১০ ভাগ হতে দেখা যায়। জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর সন্ধান দক্ষতা সোডিয়াম সিন্টিলেটরের চেয়ে কম এবং এর কম্পটন অবিচ্ছিন্নতাও বেশ প্রবল। তবে শক্তি পৃথককরণের উত্তম ক্ষমতা ঘনসন্নিবিষ্ট দুর্বল গামা শক্তিসমূহকেও পৃথক পৃথক করে স্পন্দশৃঙ্গের মাধ্যমে দেখাতে পারে (চিত্র ২.২)। তাই বহুসংখ্যক শক্তি ও স্পন্দশৃঙ্গের জটিল গামারশ্মি বর্ণালী বিশ্লেষণের জন্য জার্মানিয়াম সন্ধায়ীকেই বেছে নেয়া হয়। তবে অল্প কতিপয় গামা শক্তি সম্বন্ধীয় হলে এবং বিশেষ করে যথাযথ শক্তি নিরূপণ বিষয়ক না হয়ে তাদের তীব্রতা পরিমাপ করাই মুখ্য বিষয় হলে অন্য যে কোনো অধিকতর উপযোগী সন্ধায়ী বেছে নেয়াই শ্রেয়। এ ক্ষেত্রে উচ্চতর সন্ধান দক্ষতা, বৃহত্তর ফটোভগ্নাংশ (photofraction) এবং সস্তা দামের সোডিয়াম আয়োডাইড সিন্টিলেশন সন্ধায়ীই অধিকতর গ্রহণযোগ্য।

২.৫.১ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর সাড়া ফাংশন

২.৫.১.১ সাধারণ বৈশিষ্ট্যাদি (General characteristics) : জার্মানিয়াম সন্ধায়ী দ্বারা সমশক্তির আপতিত গামারশ্মির বর্ণালী চিত্রের উদাহরণ ২.৬ চিত্রে দেখানো হলো। ফটো-তড়িৎ প্রক্রিয়া, কম্পটন বিক্ষেপণ, জোড়া কণিকা উৎপাদন ও অন্যান্য গামারশ্মি মিথস্ক্রিয়ার সকল প্রক্রিয়াই অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর পর্যবেক্ষিত সাড়ায় অবদান রাখতে পারে ; প্রথম খণ্ডে দশম অধ্যায়ে সোডিয়াম আয়োডাইড সন্ধায়ীতে বিবৃত সাড়া ফাংশনের হুবহু অনুরূপ মিথস্ক্রিয়া এ ক্ষেত্রেও সংঘটিত হয় এবং সাড়া ফাংশন উৎপন্ন হয়। সোডিয়াম আয়োডাইডের তুলনায় জার্মানিয়ামের নিম্নতর পারমাণবিক সংখ্যা এবং বৈশিষ্ট্যগত স্বল্পতর সক্রিয় এলাকার জন্য স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালীর বিভিন্ন বৈশিষ্ট্যের গুরুত্বে উল্লেখযোগ্য পার্থক্য আনয়ন করে।

সোডিয়াম আয়োডাইডের তুলনায় জার্মানিয়ামের নিম্নতর পারমাণবিক সংখ্যার দরুন ফটো-তড়িৎ প্রক্রিয়া সংঘটন ১০—২০ গুণ স্বল্পতর হয়ে থাকে। সুতরাং একটি মিথস্ক্রিয়ায় ফটো-তড়িৎ শোষণ জার্মানিয়ামে ঘটার সম্ভাবনা বহুগুণে স্বল্পতর। জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর ক্ষুদ্র অবয়বের দরুন বহু সংখ্যক কম্পটন বিক্ষেপণ সংঘটনান্তে ফটো-তড়িৎ শোষণ ঘটার সম্ভাবনাও আপেক্ষিকভাবে অসম্ভব। উক্ত এ দুই কারণের সম্মিলিত প্রভাবে জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর সহজাত দক্ষতা সমআয়তনের সক্রিয় এলাকাধারী সোডিয়াম আয়োডাইডের চেয়ে বেশ কয়েকগুণ কম হয়ে থাকে (চিত্র ২.২)। তবে জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে পূর্ণ শক্তির স্পন্দ শৃঙ্গাধীন এলাকার ক্ষেত্রফল স্বল্প হলেও শৃঙ্গের প্রশস্ততা এত কম যে স্পন্দশৃঙ্গগুলি বর্ণালীর প্রধান ও স্পষ্ট অংশ হয়ে থাকে (চিত্র ২.২)।



চিত্র ২.৬ : জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর সমশক্তির গামারশ্মি বর্ণালী; (ক) ^{95}Nb এর 765 keV গামারশ্মি এবং (খ) ^{28}Al এর 1778.9 keV গামারশ্মির বর্ণালী।

জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর বর্ণালীতে কম্পটন নিরবচ্ছিন্নতাও বেশ প্রবল অংশ বটে। কেননা ফটো-তড়িৎ প্রক্রিয়া সংঘটনের সম্ভাবনা ও কম্পটন সংঘটনের সম্ভাবনার অনুপাত জার্মানিয়ামে সোডিয়াম আয়োডাইডের তুলনায় বহুগুণে বড়। স্পন্দ

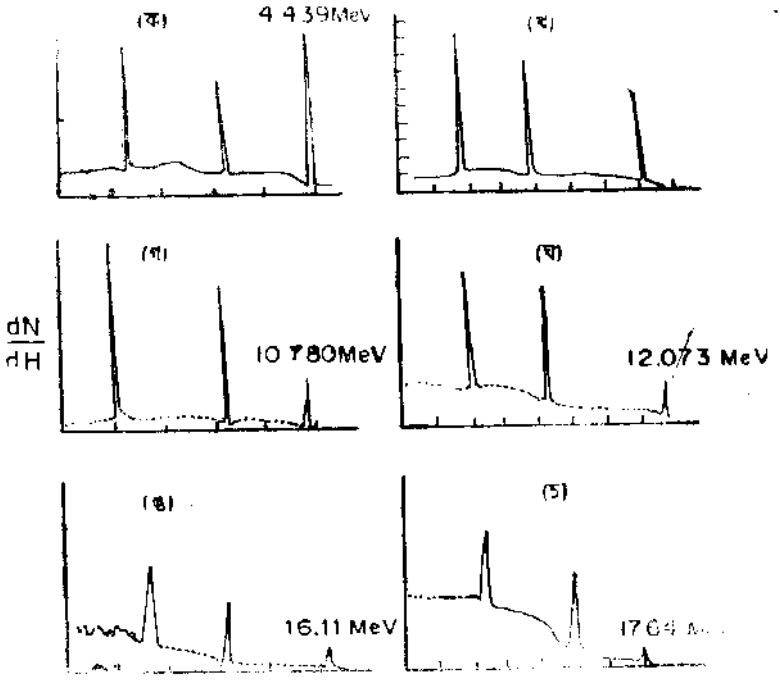
শৃঙ্গাধীন এলাকার সংঘটনের (events) সংখ্যা কম্পটন বিস্তৃতির অধীন সংঘটনের সংখ্যার চেয়ে অনেক কম। উত্তম ও উন্নীত শক্তি পৃথককরণ বণ্টনের আকারের অধিকতর বিশ্বস্ততর পুনরুৎপাদন ঘটায়। যেহেতু কম্পটন বিক্ষেপণ ইলেকট্রনের সাথে মিথস্ক্রিয়ায় সংঘটিত হয় তাই কম্পটন বিস্তৃতির ধারের (edge) অবস্থান সকল সন্ধায়ীর বর্ণালীতেই একই শক্তিতে অবস্থিত থাকে।

জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর বর্ণালীর অন্যতম বৈশিষ্ট্য হিসেবে (শৃঙ্গ/কম্পটন) অনুপাতকে প্রায়ই উদ্ধৃত করা হয়; সংজ্ঞানুসারে এটি সর্বোচ্চ ফটোশৃঙ্গে প্রাপ্ত গণনা ও এর নিচে কম্পটন ধারের সর্বোচ্চ গণনার মধ্যেকার অনুপাত বটে (চিত্র ২.৬)। গতানুগতিকভাবে কোবাল্ট-60 এর 1.33 MeV গামা শক্তিতে প্রাপ্ত এর মান উল্লেখ করা হয়ে থাকে। এটি সংশ্লিষ্ট সন্ধায়ীর শক্তি পৃথককরণ ও ফটো ভগ্নাংশের (photo fraction) যৌথ প্রভাব নির্দেশ করে। (শৃঙ্গ/কম্পটনের) উচ্চ মানই সচরাচর অধিকতর কাম্য; এর বৈশিষ্ট্যগত মানের পরিসর ১০—৫০ পর্যন্ত হয়ে থাকে।

যেহেতু অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী সেকেন্ডারি গামারশ্মির প্রতি সোডিয়াম আয়োডাইডের তুলনায় অধিকতর স্বচ্ছ, তাই নিষ্ক্রমণ (escape) স্পন্দশৃঙ্গ জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর বর্ণালীবীক্ষণে অধিকতর গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা পালন করে। বিকিরণের কোনো সুনির্দিষ্ট পরিমাণ শক্তি সন্ধায়ী থেকে গুরুত্বপূর্ণ সম্ভাবনায় নিষ্ক্রান্ত হলে বর্ণালীতে নিষ্ক্রমণ স্পন্দশৃঙ্গ উদ্ভূত হয়ে থাকে। ফটো-তড়িৎ প্রক্রিয়া অন্তে সৃষ্ট বৈশিষ্ট্যমূলক এক্সরের জার্মানিয়াম সন্ধায়ী থেকে নিষ্ক্রমণ গুরুত্বপূর্ণ হতে পারে বিশেষ করে ক্ষুদ্রায়তন সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে। এমতাবস্থায় বর্ণালীতে ফটোশৃঙ্গের 11 keV নিচের শক্তিতে একটি স্পন্দশৃঙ্গ দেখা দিবে; ফটোশৃঙ্গ থেকে এর শক্তি পার্থক্যটুকু হবে জার্মানিয়ামের K-খোলক থেকে উদ্ভূত K-এক্সরের শক্তির সমান। নিম্ন শক্তির আপতিত গামারশ্মির ক্ষেত্রে এক্সরের এ সকল নিষ্ক্রান্ত শৃঙ্গ সর্বাধিক প্রবল হয়ে থাকে। কেননা ফটো-তড়িৎ শোষণ নিম্ন শক্তিতে সর্বাধিক সম্ভাব্য সংঘটন এবং মিথস্ক্রিয়াও বেশিরভাগ ক্ষেত্রে সন্ধায়ী পৃষ্ঠের কাছাকাছি জায়গায় ঘটে।

উচ্চ শক্তির গামারশ্মির ক্ষেত্রে সন্ধায়ীতে জোড়া কণিকা উৎপাদন অন্তে সৃষ্ট বিনাশ (annihilation) বিকিরণের নিষ্ক্রমণে অত্যন্ত গুরুত্ববহ। মনে রাখতে হবে যে জোড়া কণিকা উৎপাদন প্রক্রিয়ায় আপতি গামারশ্মি সন্ধায়ীর মিথস্ক্রিয়াস্থলে ইলেকট্রন-পজিট্রন জোড়া উৎপাদন করে যাদের গতিশক্তি (kinetic energy) সন্ধায়ীতে ব্যয়িত হয়ে থাকে; তবে পজিট্রন যাত্রাপথের মাথায় পৌঁছে পরস্পর বিপরীতমুখী দুটি 0.511 MeV শক্তির বিনাশ বিকিরণ সৃষ্টি করে বিলুপ্ত হয়ে যায়। ক্ষুদ্রায়তন বিধায় জার্মানিয়াম সন্ধায়ী থেকে এরা উভয়ে বা যে কোনো একটি

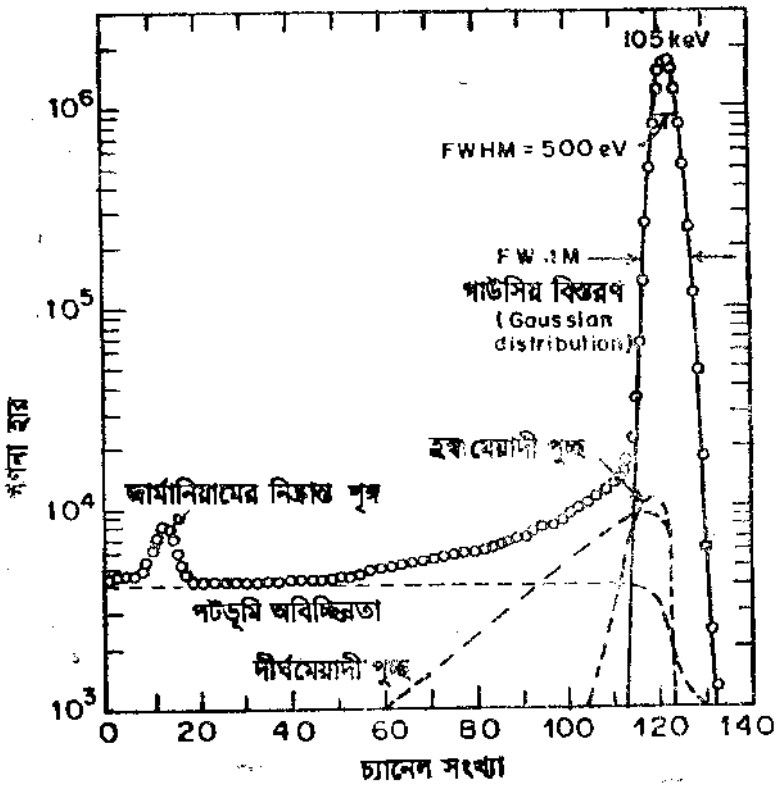
নিষ্ক্রান্ত হয়ে যায়। সুতরাং শক্তি বর্ণালীতে উভয়ই বা একটি বিনাশ ফোটন গামারশ্মির আদি শক্তি থেকে যে অংশটুকু নিয়ে নিষ্ক্রান্ত হয় তদনুপাতে পূর্ণ শক্তি স্পন্দশৃঙ্গের নিচে নিষ্ক্রমণ স্পন্দশৃঙ্গ আবির্ভূত হবে। যদি উভয় বিনাশ ফোটনই নিষ্ক্রান্ত হয়ে যায় তাহলে ডাবল নিষ্ক্রমণ স্পন্দশৃঙ্গ (double escape peak) পূর্ণ শক্তি স্পন্দশৃঙ্গ (full energy peak) থেকে 1.02 MeV শক্তির নিচে আবির্ভূত হবে। যে সকল সংঘটনে একটি বিনাশ ফোটন নিষ্ক্রান্ত হয় আর অপরটি পুরোপুরি শোষিত হয় সে ক্ষেত্রে একক নিষ্ক্রান্ত স্পন্দশৃঙ্গ পূর্ণ শক্তি স্পন্দশৃঙ্গ থেকে 0.511 MeV নিচে আবির্ভূত হয়। আপতিত গামারশ্মির শক্তি পর্যাপ্ত পরিমাণে উচ্চ হলে পূর্ণ শক্তি শোষিত হওয়ার সম্ভাবনা অত্যন্ত ক্ষীণ হয়ে থাকে এবং নিষ্ক্রান্ত স্পন্দশৃঙ্গ সন্ধায়ীর সাড়া ফাংশনে সর্বাধিক প্রবল হয়ে দেখা দেয়। তাদের অবস্থান ২.৭ চিত্রের বর্ণালীসমূহে সবিস্তারে প্রদর্শন করা হলো। নিষ্ক্রান্ত স্পন্দশৃঙ্গের



চিত্র ২.৭ : অব্যাখ্যাত পূর্ণ শক্তি, একক নিষ্ক্রান্ত ও ডাবল নিষ্ক্রান্ত স্পন্দশৃঙ্গের নমুনা-চিত্র। (100 ঘন সেন্টিমিটার (cm³) Ge(Li) সন্ধায়ী দ্বারা ৪.৬৩৯ থেকে ১৭.৬৪ MeV পর্যন্ত শক্তির গামা ফোটনের জন্য রেকর্ডকৃত)।

সুস্পষ্টতার দরুন প্রায়শই তাদেরকে আপতিত বিকিরণের আদি শক্তি নিরূপণার্থে পূর্ণ শক্তি স্পন্দশৃঙ্গের পরিবর্তে কাজে লাগানো হয়। এ ক্ষেত্রে অবস্থাভেদে একক নিষ্ক্রান্ত স্পন্দশৃঙ্গের সাথে 0.511 MeV যোগ করে আর ডাবল নিষ্ক্রান্ত শৃঙ্গের সাথে 1.02 MeV যোগ করে আপতিত ফোটনের আদি শক্তি পাওয়া যায়।

২.৫.১.২ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর স্পন্দশৃঙ্গের আকার (Peak shape) : অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী দ্বারা রেকর্ডকৃত বর্ণালীর স্পন্দশৃঙ্গের অধীন এলাকার আয়তন যথাযথ পরিমাপ করতে হলে সংশ্লিষ্ট স্পন্দশৃঙ্গটির আকার সবিস্তারে জানা প্রয়োজন। স্পন্দশৃঙ্গের আকারের কিছু সম্ভাব্য বৈশিষ্ট্যের খুঁটিনাটি ২.৮ চিত্রে সবিস্তারে দেখানো হলো। এ ক্ষেত্রে অধিকাংশ পরীক্ষণলব্ধ উপাত্তের ফিটের (fitting) কাজটি গাউসীয় বণ্টনের (Gaussian distribution) পরিবর্তন ও সংশোধনের সাহায্যে সম্পাদন করা হয় ; নিম্ন শক্তির পাশে পুচ্ছায়ন (tailing) অনুমোদনের মাধ্যমে তা করা হয়ে থাকে। অসম্পূর্ণ আধান সংগ্রহ বা সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকা



চিত্র ২.৮ : জার্মানিয়াম সন্ধায়ী থেকে প্রাপ্ত স্পন্দশৃঙ্গের পুঙ্খানুপুঙ্খ আকার চিত্র।

থেকে ইলেকট্রন বা ব্রেমস্‌স্ট্রালুং নিষ্ক্রমণসহ আরো কতিপয় ভৌত প্রভাবের ফলে পুচ্ছায়ন উদ্ভূত হয়। হ্রস্ব মেয়াদী পুচ্ছ ও দীর্ঘ মেয়াদী পুচ্ছের মধ্যে বিভেদ হচ্ছে হ্রস্ব মেয়াদী পুচ্ছের স্পন্দশৃঙ্গের পাদমূলে এর আকারে অধিকতর গুরুতর প্রভাব ফেলে অথচ দীর্ঘমেয়াদী পুচ্ছকে পটভূমির বাড়তি অংশরূপে ধরে নেয়া চলে। পুচ্ছায়নের ভয়াবহতা জানতে FWHM এর মান উদ্ধৃত করা হয়ে থাকে। উত্তম মানের সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে FW.1M এর মান FWHM মানের অর্ধেকের কম হওয়া বাঞ্ছনীয় (খাঁটি গাউসিয়ান শৃঙ্গের ক্ষেত্রে (FW.1M/FWHM) = 1.82 হয়ে থাকে)।

২.৫.২ **বর্ণালীর অবিচ্ছিন্নতার বিস্তৃতি হ্রাসের পদ্ধতি** (Methods for continuum reduction) : একটি আদর্শ গামারশ্মি স্পেকট্রোমিটারের একটি স্পন্দশৃঙ্গবিশিষ্ট সাড়া ফাংশন থাকা উচিত এবং সাথে কোনো বিস্তৃতি থাকা উচিত নয়। কিন্তু বাস্তবে দেখা যায় উল্টাটি। জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর বর্ণালীতে প্রবল বিস্তৃতি বিদ্যমান থাকে যা অন্যান্য গামারশ্মির নিম্ন-তীব্রতার স্পন্দশৃঙ্গসমূহকে ঢেকে বা অস্পষ্ট করে দিতে পারে। অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর ফটোভগ্নাংশ (photofraction) সোডিয়াম আয়োডাইড সন্ধায়ীর চেয়ে কম। সুতরাং প্রথম খণ্ডে দশম অধ্যায়ে বিবৃত বিস্তৃতি হ্রাসের পদ্ধতিগুলো অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীতে প্রয়োগ করে আরো বৃহত্তর সুবিধা হাসিল করা সম্ভব।

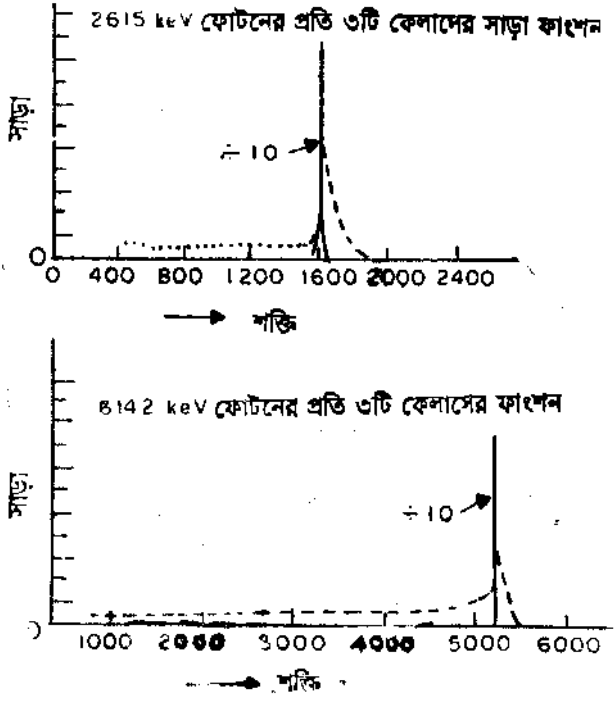
২.৫.২.১ **অসমাপতন পদ্ধতিতে কম্পটন প্রত্যাখ্যান** (Compton rejection by anticoincidence method) : সংশ্লিষ্ট অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীটি বিশালায়তন বলয়াকৃতির সন্ধায়ী দ্বারা বেষ্টিত থাকলে প্রাথমিক সন্ধায়ীর কম্পটন বিক্ষেপণে সৃষ্ট বিক্ষিপ্ত গামারশ্মি বেষ্টনকারী এ বলয়ে মিথস্ক্রিয়া করতে পারে। প্রাথমিক সন্ধায়ীর অনেক কম্পটন মিথস্ক্রিয়াকেই তাই প্রত্যাখ্যান করা যায় অসমাপতন (anticoincidence) পদ্ধতিতে। যেসব সংঘটনে প্রাথমিক সন্ধায়ীতে পূর্ণ শক্তি শোষণ ঘটে এবং বিক্ষিপ্ত বা সেকেন্ডারি বিকিরণের নিষ্ক্রমণ ঘটে না সেগুলো অসমাপতন চালনায় ক্ষতিগ্রস্ত হয় না। অসমাপতন বলয় সন্ধায়ী হিসেবে বিশালায়তন দক্ষ সিন্টিলেটর ব্যবহারের মাধ্যমে কম্পটন বিস্তৃতি ২ থেকে ৩ গুণ হ্রাস করানো সম্ভব। জটিল ক্ষয় পদ্ধতির রেডিও-আইসোটোপ উৎসের ক্ষেত্রে একটি অসুবিধা দেখা দেয়; অনেক গামারশ্মিই তখন সমাপতনে নির্গত হতে পারে এবং একই ভাঙ্গন (disintegration) থেকে নির্গত স্বতন্ত্র গামারশ্মি দুটি সন্ধায়ী পদ্ধতিতেই মিথস্ক্রিয়া করার সম্ভাবনা রয়েছে। এ সংঘটনটি তাই প্রত্যাখ্যাত হয়ে থাকে এবং এভাবে অনিচ্ছাকৃতভাবেই কতিপয় পূর্ণ শক্তি স্পন্দশৃঙ্গ অবদমিত হয়ে থাকে।

২.৫.২.২ সমষ্টি সমাপতন মোডে বিস্তৃতি হ্রাসকরণ (Sum coincidence mode of continuum reduction) : কম্পটন বিস্তৃতির অধিকাংশটিই একবার কম্পটন বিক্ষেপণের পর বিক্ষিপ্ত ফোটনটির সন্ধায়ী থেকে নিষ্ক্রমণের দরুন গড়ে উঠে ; অথচ যে কোনো শক্তির গামারশ্মির পূর্ণ শক্তি শোষণ সংঘটন সংশ্লিষ্ট ফোটনটির কতিপয় অনুক্রমিক বিক্ষেপণের শেষে ফটো-তড়িৎ শোষণের সমন্বয়ে গড়ে উঠে। স্পন্দশৃঙ্গ বনাম কম্পটন অনুপাত বাড়ানোর উপায় হচ্ছে সংশ্লিষ্ট ফোটনটিকে গ্রহণের আগে একাধিক মিথস্ক্রিয়া সন্ধায়ীতে সংঘটন করানো। সংশ্লিষ্ট জার্মানিয়াম সন্ধায়ীকে সেজন্য একাধিক অংশে (segment) বিভক্ত করা হয় (অথবা কতিপয় স্বতন্ত্র সন্ধায়ী গায়ে গায়ে লাগিয়ে স্থাপন করা হয়)। এমতাবস্থায় দুই বা ততোধিক স্বতন্ত্র অংশ থেকে সমাপতিত স্পন্দ খুঁজে নেয়া হয়। সমাপতন পাওয়া গেলে সন্ধায়ীর বিভিন্ন উপবিভাগ থেকে প্রাপ্ত উৎপাদের (output) সমষ্টি করে রেকর্ড করা হয়। চূড়ান্ত বর্ণালীটিতে থাকবে শুধু পূর্ণ শক্তি স্পন্দশৃঙ্গ যা বৈশিষ্ট্যহীন বিস্তৃতির শিরোভাগে থাকে। এভাবে কম্পটন বিস্তৃতিকে বহুলাংশে দমন করা হয় এবং কোনো আকস্মিক কম্পটন ধারও (edge) থাকে না।

উদাহরণস্বরূপ বলা যায় যে মি. পাল্‌ম প্রমুখ (J.M. Palm, R.E. Wood and O. H. Puckett, IEEE, Trans. Nucl. Sc., NS 15, No. 3, 397 (1968)) দুটি সমকেন্দ্রিক সমাক্ষিক জার্মানিয়াম সন্ধায়ী সমবায়ে একটি সমষ্টি-সমাপতন (sum coincidence) স্পেকট্রোমিটার তৈরি করেন। 300—1800 keV এর ফোটনের জন্য পূর্ণ শক্তি স্পন্দশৃঙ্গ ও গড় কম্পটন বিস্তৃতির অনুপাতটি একই আয়তনের জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর অনুপাতের তুলনায় 8 থেকে ৫ গুণ বেড়ে যায়। কম্পটন ধার এবং ডাবল নিষ্ক্রমণ স্পন্দশৃঙ্গ অপসৃত হয়। এসব উন্নয়ন দক্ষতা হ্রাসের বিনিময়ে পাওয়া কেননা কোনো একটি উপবিভাগে সম্পূর্ণ শক্তি শোষণ ঘটলে এক্ষেত্রে সংশ্লিষ্ট সংঘটনটির অপচয় ঘটে থাকে।

২.৫.২.৩ জোড়া স্পেকট্রোমিটার দ্বারা বিস্তৃতি হ্রাসকরণ ঃ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর রেকর্ডেড বর্ণালী সরলীকরণে একটি ভিন্ন উপায় ডাবল নিষ্ক্রমণ স্পন্দশৃঙ্গ-বাছাই করে নেয়া প্রয়োজন। গামারশ্মির শক্তি পর্যাপ্ত উচ্চ হলে সংঘটিত মিথস্ক্রিয়ার একটি উল্লেখযোগ্য অংশ জোড়া-কণিকা উৎপাদন প্রক্রিয়ায় ঘটবে এবং পজিট্রন বিনাশের দরুন উদ্ভূত ফোটনদ্বয়ই সন্ধায়ী থেকে নিষ্ক্রান্ত হয়ে যাবে। যেহেতু উক্ত ফোটনদ্বয় পরস্পর বিপরীতমুখে ধাবিত হয় প্রাথমিক সন্ধায়ীর দুই বিপরীত পাশে দুটি অতিরিক্ত সন্ধায়ী স্থাপন করে যুক্তিযুক্ত দক্ষতার সাথে এদের সন্ধান করা সম্ভব। এবার সন্ধায়ীত্রয়ের মধ্যে সমাপতন চাইলে ডাবল নিষ্ক্রমণ স্পন্দশৃঙ্গ বাছাই অত্যন্ত সুনির্ধারিত হবে এবং বিস্তৃতির বহুলাংশই অবদমিত হবে ; তবে বিনিময়ে দক্ষতায় বেশ বড় রকমের ভাটা পড়বে। কেন্দ্রীয় জার্মানিয়াম সন্ধায়ীকে ঘিরে দুটি NaI(Tl)

সিন্টিলেটর সন্ধায়ীর অবস্থান-অবস্থা প্রায়ই সচরাচর ব্যবস্থার মত। ২.৮ চিত্রে জোড়া স্পেকট্রোমিটারের সরল সাড়া ফাংশন দেখানো হলো।



চিত্র ২.৯ : জোড়া স্পেকট্রোমিটাররূপে চালিত Ge(Li) সন্ধায়ীর সাড়া ফাংশন (দুটি NaI (Tl) সন্ধায়ীর সংযোগে পরিচালিত)।

২.৫.৩ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর শক্তি ক্রমাঙ্কন (Energy calibration)

২.৫.৩.১ শক্তি ক্রমাঙ্কন উৎস (Sources) : বর্ণালীতে বিদ্যমান বিভিন্ন শক্তির গামা স্পন্দশৃঙ্গ যথাযথ শনাক্তকরণের জন্য অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর স্পন্দ উচ্চতার স্কেলকে (pulse height scale) পরম গামা শক্তির মান অনুসারে ক্রমাঙ্কন করে নেয়া দরকার। অনেক দৈনন্দিন প্রয়োগেই বর্ণালীতে আবির্ভূত হতে পারে এমন গামারশ্মির কথা আগাম অনুমান করা যায় এবং তদনুসারে স্পন্দশৃঙ্গ অবলীলাক্রমে শনাক্ত করা যায় সামান্য পরিদর্শনে। আবার কিছু কিছু প্রয়োগ ক্ষেত্রে পূর্ব থেকে অজানা গামা বিকিরণ বর্ণালী পাওয়া যায় যাতে শক্তি স্কেলের নিঃসন্দিহান ক্রমাঙ্কন পাওয়া যায় না। এ ক্ষেত্রে সচরাচর একটি আলাদা অথচ পূর্ব থেকে জ্ঞাত শক্তি স্পন্দ শৃঙ্গের গামারশ্মিকে আদর্শ মানের ক্রমাঙ্কন উৎস হিসেবে ব্যবহার করে বর্ণালীকে

শক্তি ক্রমাঙ্কন করে নেয়া হয়। ক্রমাঙ্কনের জন্য ব্যবহৃত উৎসটির গামাবিকিরণের শক্তি অজ্ঞাত শক্তি বর্ণালী থেকে খুব পার্থক্যে না থেকে নিকটে থাকা আবশ্যক; তাতে ঠিকঠিক ক্রমাঙ্কন ঘটবে। যেহেতু সর্বোত্তম স্পেকট্রোমিটারও কয়েক হাজার চ্যানেলের সুবিস্তৃত পরিসরে এক বা দু'চ্যানেলের অরৈখিকতা প্রদর্শন করে থাকে তাই সাড়া শক্তি পরিসর জুড়ে বেশ কয়েকটি ক্রমাঙ্কন স্পন্দশৃঙ্গ দ্বারা শক্তি ক্রমাঙ্কন করে নেয়া শ্রেয়। তাতে অরৈখিকতার বিহিত ঘটে থাকে। ২.১ সারণিতে শক্তি ক্রমাঙ্কনে ব্যবহৃত কতিপয় আদর্শ উৎসের তালিকা দেয়া হলো।

সারণি ২.১ ঃ শক্তি ক্রমাঙ্কনে আদর্শরূপে ব্যবহৃত কতিপয় গামারশ্মি।

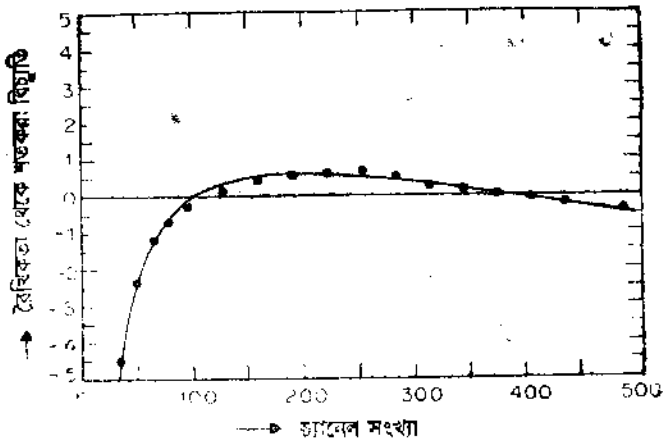
উৎস	শক্তি (keV)	উৎস	শক্তি (keV)	উৎস	শক্তি (keV)
^{241}Am	59.536±0.001	^{192}Ir	308.440±0.10	^{88}Y	898.023±0.065
^{109}Cd	88.034±0.010	^{131}I	364.491±0.015	^{60}Co	1173.231±0.030
^{182}Ta	100.106±0.001				
^{57}Co	122.046±0.020	^{198}Au	411.792±0.008	^{22}Na	1274.550±0.040
^{144}Ce	133.503±0.020	^{207}Bi	569.690±0.030	^{60}Co	1332.508±0.015
				^{208}Tl	2614.708±0.050
^{203}Hg	279.938±0.010	^{137}Cs	661.615±0.030	^{24}Na	2754.142±0.060

২.৫.৩.২ **ক্রমাঙ্কন রেখাচিত্র** (Calibration curve) : প্রয়োজনীয় শক্তি পরিসরের সমগ্র অংশ জুড়ে শক্তি ক্রমাঙ্কন বিন্দু প্রতিষ্ঠা শেষে শক্তি বনাম চ্যানেল সংখ্যা সংক্রান্ত ক্রমাঙ্কন রেখাচিত্র ছক কাগজে প্রস্তুত করা হয় সাধারণ নিয়মে। সেজন্য সাধারণ কৌশলটি হচ্ছে নিম্নোক্ত পলিনোমিয়ালটির (polynomial) ন্যূনতম বর্গে (least square) খাপ খাওয়ানো :

$$E_i = \sum_{n=0}^{N} a_n C_i^n ,$$

যেখানে E_i হচ্ছে C_i চ্যানেলের শক্তি। অরৈখিকতার পরিমাণের উপর নির্ভর করে $N = 4$ বা 5 পর্যায়ের যে কোনো পলিনোমিয়ালই নমুনাগত জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর জন্য সচরাচর পর্যাপ্ত হয়ে থাকে।

যেহেতু অরৈখিকতার পরিমাণ অধিকাংশ ক্ষেত্রেই অত্যন্ত স্বল্প হয়ে থাকে, তাই ক্রমাঙ্কন রেখাচিত্রকে মাঝে মাঝে নিখুঁত (perfect) রৈখিকতা বনাম চ্যানেল সংখ্যা থেকে বিচ্যুতির প্লটরূপে উপস্থাপন করা হয়। এ ধরনের প্রতিনিধিত্বমূলক প্লট ২.১০ চিত্রে দেয়া হলো।



চিত্র ২.১০ : জার্মানিয়াম সন্ধানী পদ্ধতির জন্য একটি নমুনাগত ব্যবকলনী (differential) রৈখিকতার রেখন্যাস (plot)।

২.৫.৩.৩ **স্পন্দশৃঙ্গ অবস্থানের দিকগত নির্ভরশীলতা** : গামারশ্মির শক্তি অত্যন্ত সূক্ষ্ম ও যথাযথভাবে পরিমাপ করতে হলে ক্রমাঙ্কনের জন্য ব্যবহৃত আদর্শমান উৎসটি ও অজ্ঞাত উৎসটি এমন সাবধানতার সাথে স্থাপন করতে হবে যেন নির্গত গামারশ্মি একই দিক থেকে সন্ধানীতে আপতিত (incident) হয়। গামা-রশ্মির উৎসকে সন্ধানীর চতুর্দিকে ঘুরিয়ে পর্যবেক্ষণ করে দেখা গেছে 110 keV পর্যন্ত ভ্রংশ (shift) ঘটে থাকে {(1) P.C. Lichtenberger and I.K. Mackenzie, Nucl. Inst. and Meth. 116, 177 (1974) ও (2) (R.G. Helmer, R.J. Gehreke and R.C. Greenword, Nucl. Inst. and Methods, 113, 51 (1975) }। সূক্ষ্মতম ও যথাযথ পরিমাপনের ক্ষেত্রে এসব ভ্রংশ গুরুতর প্রভাব ফেলার জন্য যথেষ্ট বড়।

দিক পরিবর্তনের দরুন স্পন্দশৃঙ্গ ভ্রংশ দুটি কারণে ঘটে থাকে বলে ধারণা করা হয় ; তন্মধ্যে একটি হচ্ছে গামারশ্মির মিথস্ক্রিয়ায় উৎপাদিত সেকেন্ডারি ইলেকট্রন সন্ধানীর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র থেকে সামান্য পরিমাণ শক্তি অর্জনের প্রবণতা আর দ্বিতীয় সম্ভাব্য উৎসটি হচ্ছে তড়িৎ আধান সংগ্রহের দক্ষতায় যে কোনো পার্থক্য উদ্ভূত হওয়া। এ ধরনের পার্থক্য স্পন্দশৃঙ্গের বিস্তৃতিরও (broadening) কারণ হয়ে থাকে।

২.৫.৪ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর সন্ধান দক্ষতা (Detection efficiency)

২.৫.৪.১ দক্ষতা ক্রমাঙ্কন (Efficiency calibration) : গামারশ্মির পরম নির্গমন হারের পরিমাণ জানতে হলে সন্ধায়ীর দক্ষতা সম্বন্ধে জানতে হবে। বিন্দুবত উৎস থেকে ফোটন নির্গমণের হার (s) তখন হিসাব করা যায় পূর্ণ শক্তি স্পন্দশৃঙ্গ এলাকার আয়তন মেপে এবং নিম্নোক্ত সমীকরণ ব্যবহার করে :

$$S = N \frac{4\pi}{\epsilon_{ip}\,\Omega}$$

যেখানে, ϵ_{ip} হচ্ছে সহজাত স্পন্দশৃঙ্গ দক্ষতা,

N হচ্ছে পূর্ণ শক্তি স্পন্দশৃঙ্গাধীনে সংঘটনের সংখ্যা,

এবং Ω সন্ধায়ী কর্তৃক উৎসস্থলে উৎপন্ন ঘন কোণ (solid angle)।

জার্মানিয়াম সন্ধায়ী দ্বারা গামা বর্ণালীবীক্ষণে পূর্ণ শক্তি স্পন্দশৃঙ্গস্থলে একক নিষ্ক্রমণ স্পন্দশৃঙ্গাধীন বা ডাবল নিষ্ক্রমণ স্পন্দশৃঙ্গাধীন ক্ষেত্রফল মেপেও দক্ষতা নিরূপণ করা হয়। প্রকাশিত উপাত্ত বা আয়তন থেকেও সন্ধান দক্ষতা নিরূপণ করা যায় তবে ফলাফলের সঠিকতা (accuracy) শতকরা ১০—২০ ভাগের বেশি হয় না। এ ক্ষেত্রে একটি প্রধান অসুবিধা এই যে এসব সন্ধায়ীর আয়তনের কোনো আদর্শ মান (standardized) স্থির (set) করা নেই এবং এদের সক্রিয় এলাকা ও আয়তন যথাযথভাবে নিরূপণ করা কঠিন। তদুপরি দীর্ঘদিনের ব্যবহারে তড়িৎ আধান সংগ্রহের দক্ষতায় অবনমন এবং জানালার পুরুত্বে পরিবর্তন সন্ধায়ীর দক্ষতায় পরিবর্তন ঘটায়।

অতএব ব্যবহারকারীকে অন্য কোনো উপায়ে ক্রমাঙ্কিত উৎস ব্যবহার করে নির্দিষ্ট সময়ান্তরে স্বাভাবিক নিয়মে জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর দক্ষতা ক্রমাঙ্কণ করে নিতে হবে। এমতাবস্থায় সন্ধায়ীর আকার আয়তন সম্বন্ধীয় যে কোনো অনুমান ক্রমাঙ্কণ ও বাস্তব পরিমাপন উভয় ক্ষেত্রেই একই থাকে বলে পরিমাপিত সক্রিয়তায় কোনো ভ্রান্তি থাকে না। তবে উৎস ও সন্ধায়ীর মাঝে বিদ্যমান দূরত্ব তথাপিও যথাযথভাবে মেপে নিরূপণ ও পুনরুৎপাদন করা প্রয়োজন যেন আপেক্ষিক ঘন কোণে (solid angle) কোনো ভ্রান্তি না ঢুকতে পারে। পরীক্ষণলব্ধ দক্ষতা বনাম শক্তি রেখাচিত্র তৈরিতে প্রয়োজনীয় সাড়া শক্তি পরিসর (energy range) জুড়ে নানাবিধ গামারশ্মির শক্তি ব্যবহার করে ক্রমাঙ্কণের কাজটি সাধারণভাবে সম্পন্ন করা হয়।

বিভিন্ন স্টান্ডার্ড গবেষণাগার শতকরা $\frac{1}{2}$ থেকে 2 ভাগ যথার্থতায় ক্রমাঙ্কিত গামারশ্মি নির্গমণকারী তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ সরবরাহ করে থাকে। কোনো কোনো একক তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ উৎসও বেশ শক্তি ব্যবধানে পৃথক পৃথক

গামারশ্মি যোগান দিয়ে থাকে যাদের স্পন্দশৃঙ্গের আয়তন নিরূপণ করে সন্ধানীর দক্ষতা ক্রমাঙ্কন করা যেতে পারে। শক্তির স্কেল বিস্তৃত পরিসরব্যাপী ছড়ানো থাকলে নানাবিধ শক্তির বিভিন্ন গামা উৎস পর্যায়ক্রমে ব্যবহার করা যায়। ২.২ সারণিতে সন্ধানীর দক্ষতা ক্রমাঙ্কনে ব্যবহৃত কতিপয় তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ প্রয়োজনীয় ক্ষয় উপাত্তসহ তালিকাবদ্ধ করা হলো।

সারণি ২.২ ঃ দক্ষতা ক্রমাঙ্কনে স্টান্ডার্ডরূপে ব্যবহৃত কতিপয় তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের ক্ষয় উপাত্ত।

উৎস	অর্ধায়ু ($T_{1/2}$)	শক্তি (keV)	I (%) photon yield	($\Delta I/I$) (%)
^{241}Am	432y	59.5	36.0	1.0
^{203}Hg	46.6d	70.8/72.9	10.1	1.5
		279.2	81.3	0.2
^{198}Au	2.696d	411.8	95.53	0.1
^{141}Ce	32.5d	35.6/36.0	12.6	2.0
		145.5	48.4	0.9
^{137}Cs	30.0y	31.8/32.2	5.64	2.0
		661.6	85.3	0.4
^{134}Cs	2.06y	604.6	97.5	0.2
^{131}I	8.02d	364.5	82.4	0.5
^{88}Y	106.6d	14.2	52.5	1.5
		1836 1	99.4	0.2
^{85}Sr	64.8d	13.4	50.7	1.5
		514.0	99.28	0.0
^{60}Co	5.27y	1173.2	99.88	0.0
		1332.5	99.98	0.0
^{57}Co	272d	14.4	9.6	1.0
		122.1	85.6	0.3

Accession No. 17963
BANSDOC Library

^{24}Na	15.01	{ 1368.5 { 2754.0	100 99.85	0.0 0.0
^{22}Na	2.60	1274.5	99.95	0.0

I = প্রতিটি ক্ষয় ভাঙনে উৎপাদিত ফোটন শতকরা হিসাবে।

$\Delta I/I$ = উৎপাদনে অনিশ্চয়তা (uncertainty)।

প্রতিটি এক শক্তি বিশিষ্ট (single energy) উৎসের বর্ণালী রেকর্ড করা ও ব্যাখ্যা-বিশ্লেষণ করা সহজ হলেও ক্রমাঙ্কন প্রক্রিয়াটি সময়বহুল ও ক্লান্তিকর ; তার পরিবর্তে পৃথক পৃথক অনেক সংখ্যক গামারশ্মি নির্গতকারী একটি উৎস ব্যবহার করলে সুবিধা এই যে একটি বর্ণালী রেকর্ড ও বিশ্লেষণ করলেই যথেষ্ট। অবশ্য একটির সাথে অন্যটির ব্যতিচারের সমস্যা গুরুতর হয়ে দাঁড়াতে পারে। এ কাজে রেডিয়াম-২২৬ ও ক্ষয় উৎপাদসমূহকে (decay products) তেজস্ক্রিয় ভারসাম্য-অবস্থায় (সারণি ২.৩) ব্যবহার করা যায়।

সারণি ২.৩ ঃ রেডিয়াম-২২৬ এবং এর উৎপাদ কর্তৃক তেজস্ক্রিয় সাম্যাবস্থায় নির্গত গামারশ্মিসমূহ।

আইসোটোপ	গামা ফোটনের শক্তি (keV)	আপেক্ষিক তীব্রতা (intensity)
^{226}Ra	186.211 ± 0.010	9.00 ± 0.10
^{214}Pb	241.981 ± 0.008	16.06 ± 0.19
^{214}Pb	295.213 ± 0.008	42.01 ± 0.53
^{214}Pb	351.921 ± 0.008	80.42 ± 0.81
^{214}Bi	609.312 ± 0.010	100 ± 0.92
^{214}Bi	934.061 ± 0.012	6.93 ± 0.10
^{214}Bi	1120.287 ± 0.010	32.72 ± 0.39
^{214}Bi	1764.494 ± 0.014	34.23 ± 0.44
^{214}Bi	2204.215 ± 0.04	10.77 ± 0.20
^{214}Bi	2447.860 ± 0.100	3.32 ± 0.08

এগুলো 188—2446 keV পর্যন্ত শক্তি পরিসরে ক্রমাঙ্কনে কাজ দেয় আর প্রায় রেডিও আইসোটোপ গবেষণাগারেই ^{226}Ra পাওয়া যায়। বহুবিধ গামা শক্তির বিকিরণ উৎসারী এরূপ আর একটি গামা উৎস হচ্ছে ^{152}Eu (সারণি ২.৪) ; এর অর্ধজীবনও বেশ সুবিধাজনক ($T_{1/2} = 13y$) বিধায় এবং বিস্তৃত শক্তি পরিসরধারী ও মোটামুটি তীব্র বলে এটি বেশ জনপ্রিয়তা লাভ করেছে।

সারণি ২.৪ ঃ ^{152}Eu এর তেজস্ক্রিয় ক্ষয়ে উদ্ভূত বহুবিধ গামা শক্তিসমূহ।

শক্তি (keV)	আপেক্ষিক তীব্রতা
121.8	141.0 ± 4.0
244.7	36.6 ± 1.1
344.3	127.2 ± 1.3
367.8	4.19 ± 0.04
411.1	10.71 ± 0.11
444.0	15.00 ± 0.15
488.7	1.984 ± 0.023
586.3	2.24 ± 0.05
678.6	2.296 ± 0.028
688.7	4.12 ± 0.04
778.9	62.6 ± 0.6
867.4	20.54 ± 0.21
964.0	70.4 ± 0.7
1005.1	3.57 ± 0.07
1085.8	48.7 ± 0.5

1089.7	8.26 ± 0.09
1112.1	65.0 ± 0.7
1212.9	6.67 ± 0.07
1299.1	7.76 ± 0.08
1408.0	100.0 ± 1.0
1457.6	2.52 ± 0.09

* Data taken from, R.J. Gehreke, R.G. Helmer and R.C. Green Wood, Nucl. Instr. and Meth. 147, 405 (1977).

২.৫.৪.২ সন্ধান দক্ষতার উপর সমষ্টি সমাপতনের (coincidence) প্রভাব ঃ একাধিক বিকিরণ সমাপতনে নির্গত করে এমন যে কোনো উৎস ক্রমাঙ্কনের ব্যবহারে সতর্ক হতে হবে যেন স্পন্দশৃঙ্গের পরিমাপিত তীব্রতা সমষ্টি সমাপতন (sum coincidence) প্রভাব দ্বারা ক্ষতিগ্রস্ত না হয়। দুটি গামারশ্মি সমাপতনে নির্গত হলে তারা যুগপৎভাবে সন্ধায়ীতে মিথস্ক্রিয়া করতে পারে এবং ফলস্বরূপ উদ্ভূত স্পন্দটি সাধারণত কোনো একটি গামারশ্মির পূর্ণ শক্তির সাদৃশ্য স্পন্দশৃঙ্গে থাকবে না। সমস্যাটি প্রপাত গামারশ্মি নির্গমনকারী উৎসের ক্ষেত্রে অত্যন্ত গুরুত্বপূর্ণ। শুধু যে গামারশ্মির সমাপতিত সন্ধান এড়াতে হবে তাই নয় অন্যান্য সমাপতিত বিকিরণ যেমন বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রে বা ব্রেমসস্ট্রালুংও সমষ্টিকরণের কারণ হতে পারে বলে এদেরও এড়াতে হবে।

যেহেতু সমষ্টিকরণ প্রভাব ঘনকোণের বর্গের উপর নির্ভরশীল কিন্তু সাধারণ স্পন্দশৃঙ্গ রৈখিকভাবে পরিবর্তিত হয় এজন্য সমষ্টিকরণের আপেক্ষিক প্রভাব ঘনকোণ হ্রাসের মাধ্যমে হ্রাস করা সম্ভব। পরীক্ষণে দেখা গেছে উৎসসন্ধায়ী দূরত্ব কমপক্ষে ১০ সে.মি. হওয়া বাঞ্ছনীয় তবে ৩০—৪০ সে.মি. হওয়া ভাল। স্পন্দশৃঙ্গের ক্ষেত্রফল পরিমাপনে সম্ভাব্য অন্যান্য ভুল হচ্ছে সিস্টেমের নিষ্ক্রিয়কালের অযথার্থ ব্যবস্থাপনা ও স্পন্দের স্তূপীকরণ প্রভাবাদি। অপেক্ষাকৃত উচ্চ হারের স্পন্দের জন্য এ উভয় প্রভাবই গুরুত্ববহ।

২.৫.৪.৩ সন্ধান দক্ষতা উদ্ভূতির রীতিনীতি ঃ জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর স্পন্দশৃঙ্গ বা পূর্ণশক্তি দক্ষতা উদ্ভূত করার নানাবিধ উপায় রয়েছে। তন্মধ্যে সরাসরি

পরিমাপিত রাশিটি হচ্ছে পরম দক্ষতা (absolute efficiency) যা কিনা পূর্ণশক্তি স্পন্দশৃঙ্গের গণনা সংখ্যা এবং উৎস থেকে নির্গত গামারশ্মির সংখ্যার অনুপাত। যে আদর্শ ফোটন শক্তিতে এটি পরিমাপ করা হয় তা হচ্ছে কোবাল্ট-60 থেকে উৎসারিত 1.33 MeV গামারশ্মি। স্পষ্টতই পরম দক্ষতা গামারশ্মির শক্তি এবং উৎস থেকে সন্ধায়ীর সঠিক দূরত্ব এ উভয়ের উপর জোরালোভাবে নির্ভরশীল। দক্ষতা উদ্ধৃতির আরেকটি উপায় হচ্ছে সহজাত সন্ধান দক্ষতার উল্লেখ করা ; এটি হচ্ছে পূর্ণশক্তির স্পন্দশৃঙ্গাধীন এলাকার গণনা সংখ্যা ও সন্ধায়ীতে আপতিত গামারশ্মির সংখ্যার অনুপাত। এ পদ্ধতির উদ্ধৃতিতে জ্যামিতিক সুবেদিত্ব বহুলাংশে হ্রাস পায়। উচ্চ শক্তি গামা বিকিরণ যার প্রতি সন্ধায়ী অনেকটা স্বচ্ছই বলা যায় (মিথস্ক্রিয়ার সম্ভাবনা শতকরা ২০—৩০ ভাগের কম) সহজাত দক্ষতা অনেকটা সন্ধায়ীর সর্বসমেত সক্রিয় আয়তনের সমানুপাতিক। ফলে অধিকাংশ বাণিজ্যিক অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীরই সক্রিয় আয়তন ঘন সেন্টিমিটারে (cm^3) মেপে বৈশিষ্ট্য বিবরণ দেয়া হয়। অপ্রতিসম সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে সহজাত দক্ষতা সন্ধায়ীর অক্ষ ও উৎসের দিকস্থিতির (orientation) উপর নির্ভর করে পরিবর্তিত হয়ে থাকে। সমাক্ষিক বা পঞ্চ-পার্শ্ব বিশিষ্ট সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে সহজাত দক্ষতা পর্যবেক্ষিত গণনা সংখ্যা থেকে সঠিক হিসাব করা কঠিন কেননা কার্যকর ঘনকোণের (solid angle) পরিমাণে অনিশ্চয়তা থাকে।

২.৫.৪.৪ ফিগার অব মেরিট (Figure of merit) : জার্মানিয়াম গামারশ্মি স্পেকট্রোমিটারের সংখ্যাগত অন্তঃতুলনার উপায় হিসেবে মি. কুপার (J.A. Cooper, Nucl, Instr and Meth, 94,289 (1971)) একটি ফিগার অব মেরিট, (FOM) সূত্র প্রস্তাব করেন। কোনো সন্ধায়ীর উচ্চতর 'E_2' শক্তির গামা বিকিরণের উপস্থিতিতে নিম্নতর 'E_1' শক্তির গামারশ্মি সন্ধানের ক্ষমতার পরিমাণের পরিমাপ হচ্ছে ফিগার অব মেরিট। তজ্জন্য শক্তি E_1, এ পরম স্পন্দ শৃঙ্গ দক্ষতা $[\epsilon_p(E_1)]$, সন্ধায়ীর শক্তি পৃথককরণ ক্ষমতা $[R(E_1)]$ এবং E_2 গামা শক্তির জন্য E_1 শক্তিতে কম্পটন দক্ষতা পূর্ব থেকেই জেনে নিতে হবে। পরবর্তী ফ্যাক্টরটি E_2 শক্তির স্পন্দ উচ্চতায় পরিমাপিত E_1 শক্তির সাড়া ফাংশনের কম্পটন বিস্তৃতির উচ্চতার সমানুপাতিক হয়ে থাকে সাধারণভাবে। ফিগার অব মেরিটের সংজ্ঞা হচ্ছে :

$$\text{FOM}\ (E_1, E_2) = \frac{\epsilon_p(E_1)}{[R(E_1)\epsilon_{c_2}(E_1)]^{1/2}}$$

২.৫.৪.৫ সন্ধায়ীর কার্য সম্পাদনায় নানাবিধ কারণের (factor) প্রভাব (effects) :

২.৫.৪.৫.১ বিকিরণকরণের ক্ষতি : আপতিত বিকিরণ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর ক্ষতি সাধন করে এর কার্য সম্পাদনে গুরুতর অবনমন (degradation) ঘটায়।

কারণ এ ধরনের সন্ধায়ী বিকিরণপাতে তুলনামূলকভাবে অন্যান্য ধরনের সন্ধায়ীর চেয়ে অধিকতর ক্ষতি প্রবণ। বিশালায়তনের আয়ন-তাড়িত সন্ধায়ীরা বিশেষভাবে নাজুক এ ব্যাপারে কেননা বিকিরণপাতজনিত ক্ষতির ফলে এতে সৃষ্টি হয় বাড়তি ফাঁদ যা, পৃষ্ট বাঁধ বা ব্যপ্ত জংশনধারী সন্ধায়ীর জন্য তেমন গুরুত্ববহ নয়। যেহেতু অভিন্ন প্রবাহের নিউট্রনপাত গামা বিকিরণপাতের চেয়ে সন্ধায়ীর বেশি ক্ষতি সাধন করে থাকে তাই পরমাণু চুল্লী বা ত্বরক যন্ত্রের পরিবেশে দ্রুতগামী নিউট্রন পাতের ফলে সন্ধায়ীর সর্বাধিক গুরুত্বসহ ক্ষতি সাধিত হতে দেখা যায়।

বিকিরণপাতজনিত ক্ষতির প্রধান প্রভাব অর্ধপরিবাহী পদার্থের সহজাত অঞ্চলে হোলের ফাঁদ সংখ্যা বাড়ানো। বিকিরণপাতে ক্ষতিগ্রস্ত সন্ধায়ী দ্বারা সম্পাদিত পরিমাপে পরিবর্তিত পরিমাণে আধান অপচয় ঘটে এবং স্পন্দ শৃঙ্গটি নিম্নশক্তির পার্শে পুচ্ছধারী হয়ে থাকে। দ্রুতগামী নিউট্রনপাত (neutron exposure) বৃদ্ধির সাথে সাথে স্পন্দ শৃঙ্গের প্রশস্ততা (broadening) বেড়ে চলে। পরীক্ষণে দেখা গেছে প্রতিবর্গ সেন্টিমিটারে প্রায় 10^9 সংখ্যক নিউট্রনপাতে ($10^9 n/dm^2$) কার্য সম্পাদনে গুরুত্বপূর্ণ অবনমন শুরু হয় এবং ($10^9 n/cm^2$) সংখ্যক প্রবাহে সন্ধায়ী ব্যবহারের অনুপযোগী হয়ে পড়ে। তাপে অ্যানিলকরণের (annealing) মাধ্যমে এবং পরবর্তীতে পুনরায় বাহক প্রবাহের দ্বারা বিকিরণপাতজনিত ক্ষতি সরিয়ে তোলার কার্যপদ্ধতি ইতোমধ্যেই গড়ে উঠেছে (**R. Baader, W. Patzner and H. Wohlfarth, Nucl. Inst. and Meth. 117,609 (1974)**).

২.৫.৪.৫.২ **নিউট্রন-আবিষ্ট স্পন্দজনিত ক্ষতি** ঃ পটভূমি (background)-রূপে নিউট্রন উপস্থিত রয়েছে এমন অবস্থায় সন্ধায়ী ব্যবহার করলে স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালীতে এদের প্রভাবের বিষয় বিবেচনায় রেখে কাজ করতে হবে। ক্ষতির সর্বাধিক স্পষ্ট অবদান হচ্ছে বর্ণালীতে অস্থিতিস্থাপক নিউট্রন বিক্ষেপণের দরুন জার্মানিয়াম নিউক্লিয়াসের উত্তেজনন এবং অভ্যন্তরীণ রূপান্তরণে সৃষ্ট ইলেকট্রন বা এক্স-রে দরুন কপট (spurious) স্পন্দের আবির্ভাব। নিউট্রন-আবিষ্ট স্পন্দ শৃঙ্গের বিস্তার গামা-আবিষ্ট স্পন্দ শৃঙ্গের চেয়ে বেশি বলে সহজেই শনাক্ত করা চলে। স্পন্দশৃঙ্গ প্রশস্ত হওয়ার কারণ হলো উত্তেজনন শক্তির অংশ বিশেষ প্রতিক্ষেপিত জার্মানিয়াম নিউক্লিয়াসে পড়ে বলে পরিবর্তনশীল সংখ্যক ইলেকট্রন-হোল জোড়া উৎপাদিত হয়ে থাকে।

গাণিতিক সমস্যা

১। উপেক্ষণীয় ইলেকট্রনিক নয়েজে এবং পূর্ণ বাহক সংগ্রহ অবস্থায় ^{137}Cs এর 0.662 MeV গামারশ্মির শক্তি পৃথককরণ কত ?

২। 38 cm^3 আয়তনের সমাক্ষিক Ge(Li) সন্ধায়ী থেকে 8.3 cm দূরে 0·25 MBq ^{137}Cs এর পূর্ণশক্তি স্পন্দ শৃঙ্গে, একটি নিষ্ক্রমণ স্পন্দ শৃঙ্গে ও ডাবল নিষ্ক্রমণ স্পন্দ শৃঙ্গে পাঁচ মিনিট কাল পরিমাপনের জন্য প্রত্যাশিত গণনা সংখ্যা কত ?

৩। একটি স্ট্যান্ডার্ড 7·6cm × 7·6cm NaI(Tl) সিন্টিলেশন সন্ধায়ীর ফটো শৃঙ্গ দক্ষতা শতকরা 8 ভাগ। 40 সে. মি. দূরে একটি বিন্দুবত ^{60}Co উৎসের 1.33 MeV স্পন্দ শৃঙ্গে গণনা হার বের কর।

তৃতীয় অধ্যায়

লিথিয়াম তাড়িত সিলিকন সন্ধায়ী
(Lithium Drifted Silicon Detector)

৩.১ ভূমিকা

সিলিকন পদার্থে লিথিয়াম আয়ন তাড়নের মাধ্যমে প্রতিবিহিত অঞ্চল সৃষ্টি করে অর্ধ-পরিবাহী সন্ধায়ী উৎপাদন করা যায়। সক্রিয় এলাকাটির পুরুত্ব সাধারণ জংশন সন্ধায়ীর তুলনায় বেশ বৃহত্তর হয়ে থাকে। লিথিয়াম আয়ন তাড়িত সিলিকন সন্ধায়ী-সমূহের Si (Li) সন্ধায়ী বলা হয়। জার্মানিয়ামের পারমাণবিক সংখ্যার তুলনায় ($z=৩২$) সিলিকনের নিম্নতর পারমাণবিক সংখ্যা ($z=১৪$) থেকে স্পষ্ট বুঝা যায় যে, যে কোনো গামা রশ্মির জন্য সিলিকনে ফটো তড়িৎ প্রক্রিয়া সংঘটনের সম্ভাবনা জার্মানিয়ামের চেয়ে কম। তাই Si (Li) সন্ধায়ী গামারশ্মির বর্ণালী-বীক্ষণে তেমন ব্যবহৃত হয় না। তবে দুটি ক্ষেত্রে সিলিকন সন্ধায়ীর প্রয়োগ অত্যন্ত সুফলদায়ক। তার একটি হলো নিম্ন শক্তির গামা বা এক্স-রে সন্ধান। নিম্ন শক্তির এ সকল বিকিরণের জন্য কয়েক মিলিমিটার পুরু সিলিকন সন্ধায়ীতেও যুক্তিযুক্তভাবে উচ্চ হারে ফটো-তড়িৎ শোষণ ঘটে থাকে। কিছু কিছু বাড়তি সুবিধার জন্য (জার্মানিয়ামের তুলনায় অপেক্ষাকৃত স্বল্প প্রবল এক্স-রে নিষ্ক্রমণ স্পন্দ শূন্য) সিলিকন সন্ধায়ী নিম্ন শক্তির ফোটন বর্ণালিবীক্ষণে (low energy photon spectroscopy, LEPS) সর্বাধিক পছন্দনীয় হয়ে উঠেছে। সিলিকন সন্ধায়ী সুবিধাজনকভাবে প্রয়োগের দ্বিতীয় গুরুত্বপূর্ণ ক্ষেত্রটি হচ্ছে বিটা কনিকা বা অন্যান্য বাহ্যিকভাবে আপতিত ইলেকট্রন সন্ধান ও তাদের বর্ণালিবীক্ষণ। এক্ষেত্রে সন্ধায়ী উপাদানের নিম্ন পারমাণবিক সংখ্যা এক অপূর্ব ও বিশেষ সুযোগ কেননা পশ্চাৎবিক্ষেপণ (back scattering) উপেক্ষণীয় পর্যায়ে ঘটে থাকে।

৩.২ সিলিকন সন্ধায়ীর সাধারণ বৈশিষ্ট্য

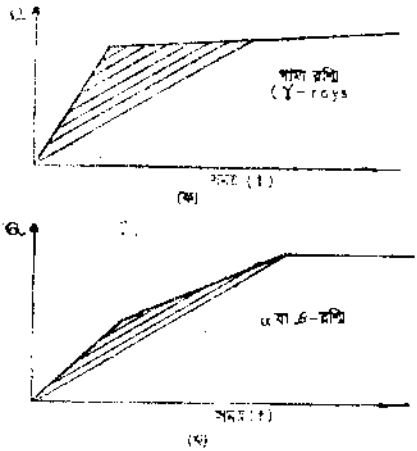
সিলিকনের অর্ধপরিবাহী ধর্মাবলী একে জার্মানিয়ামের উপর প্রাধান্য দিয়েছে: সিলিকনের অপেক্ষাকৃত বৃহত্তর শক্তি ব্যান্ড গ্যাপ নিশ্চয়তা দেয় যে, যে কোনো তাপমাত্রায় তাপীয়ভাবে উৎপাদিত লীক বিদ্যুৎ প্রবাহের পরিমাণ জার্মানিয়াম সন্ধা-য়ীতে উৎপাদিত লীক বিদ্যুতের পরিমাণের চেয়ে বেশ কম। যেহেতু এক জোড়া ইলেকট্রন হোল তৈরিতে প্রয়োজনীয় শক্তি এবং ফানো ফ্যাক্টর (fano factor) প্রায় সম তুল তাই শক্তি পৃথককরণে পরিসংখ্যানিক অবদান প্রায় একই। সুতরাং সমতুল ইলেক-ট্রনিক উপাদান ব্যবহারে শক্তি পৃথককরণ সিলিকন সন্ধায়ীতে উৎকৃষ্ট হওয়া উচিত।

নমুনাগত সিলিকন পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে ভারি আধান কণিকার জন্য শক্তি পৃথককরণ প্রায় 10—20 keV হয়ে থাকে। পর্যবেক্ষিত শক্তি বিস্তারের একটি গুরুত্বপূর্ণ ভগ্নাংশ পূর্বপরিবর্ধকের নয়েজের দরুন ঘটে এবং সন্ধায়ীর ধারকত্ব বৃদ্ধির সাথে রৈখিকভাবে বেড়ে চলে। প্রদত্ত পৃষ্ঠ এলাকার ক্ষেত্রে সন্ধায়ীর ধারকত্ব বাহক খালিকৃত অঞ্চলের পুরুত্বের উল্টানুপাতে পরিবর্তিত হয়। সিলিকন পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীতে আধান বাহকের তাপীয় উত্তেজননে উৎপন্ন বড় ধরনের লীক বিদ্যুৎ প্রবাহ নয়েজে তেমন গুরুত্বপূর্ণ অবদান রাখে না। কিন্তু Si(Li) সন্ধায়ীতে সহজাত অঞ্চল এমন পর্যাপ্ত পুরু যে গৃহতাপে লীক বিদ্যুৎ নয়েজের গুরুত্বপূর্ণ অংশ হয়ে থাকে। তাই সকল ধরনের নিম্ন নয়েজের প্রয়োগ ক্ষেত্রে সন্ধায়ীকে তরল নাইট্রোজেনের তাপমাত্রায় ঠাণ্ডা করে নেয়া হয়। এমতাবস্থায় বাণিজ্যিকভাবে প্রাপ্ত সন্ধায়ীর নয়েজ 1keV এর কম হতে দেখা যায়। যেহেতু লিথিয়াম আয়নের চলিষ্ণুতা সিলিকনে বেশ কম তাই ঘটনাক্রমে Si(Li) সন্ধায়ীর তাপমাত্রা বেড়ে গৃহ তাপমাত্রায় উঠে এলেও তেমন স্থায়ী ক্ষতি সাধিত হয় না কিন্তু স্মর্তব্য যে, Ge(Li) সন্ধায়ীকে সর্বদাই ঠাণ্ডা না রাখলে লিথিয়ামের অধঃক্ষেপ (precipitation) ও অভিপ্রয়াণ ঘটে সন্ধায়ী অকেজো হয়ে পড়ে।

৩.৩ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র ও স্পন্দের আকার

Ge(Li) সন্ধায়ীর জন্য পূর্ববর্তী অধ্যায়ের প্রদত্ত বিশ্লেষণের অধিকাংশগুলিই Si(Li) সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে সরাসরি প্রযোজ্য। লিথিয়ামের প্রতিবিধান নিখুঁতভাবে পুরোপুরি ঘটলে i-অঞ্চলে কোনো নিট আধান থাকবে না। সাধারণ সমতলীয় অবস্থান-অবস্থায় বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সমস্ত i-অঞ্চল জুড়ে ধ্রুবক থাকে এবং অবস্থা পুরোপুরি ৩.১ চিত্রের মতো হয়ে থাকে। সন্ধায়ীর তড়িৎদ্বারে আবিষ্ট তড়িৎ আধানের সময় প্রোফাইল (profile) Q(t) i-অঞ্চলে (i-region) আধানবাহক সৃজনস্থলের উপর নির্ভর করে। এ সকল পরিবর্তন স্পন্দের অগ্রধারের আকারের উপর সরাসরি ছাপ ফেলে (চিত্র ৩.১)। সন্ধায়ীতে এক্স-রে বা গামারশ্মিপাতের স্পন্দের অগ্রধারের পরিবর্তন সর্বাপেক্ষা গুরুতর হয়, কারণ এক্ষেত্রে মিথস্ক্রিয়াস্থল সারা সন্ধায়ী জুড়ে এলোমেলোভাবে বিস্তারিত হয়ে থাকে ; তড়িৎ আধানযুক্ত কণিকার ক্ষেত্রে এটি ততোটা গুরুতর হয় না। Si(Li) সন্ধায়ী দ্বারা অর্জিত সময় পৃথককরণ স্পন্দের গড় উত্থানকাল এবং উত্থানকালের বিস্তৃতি উভয়ের উপরই নির্ভরশীল। বিটা কণিকার ক্ষেত্রে সময় পৃথককরণ কয়েক ন্যানোসেকেন্ড হয় আর এক্স-রে বা গামারশ্মির ক্ষেত্রে সময় পৃথককরণ তার চেয়েও কম পাওয়া যায়।

সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকা জুড়ে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সর্বত্র সমসত্ত্বে না থাকলেও উৎপাদ স্পন্দের আকার বদলে যেতে পারে। সমতলীয় সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকায় গ্রাহক ও দাতা বাহকের নিখুঁত প্রতিবিধান ঘটলেই শুধু বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র সর্বত্র সমসত্ত্বে ঘটতে পারে।

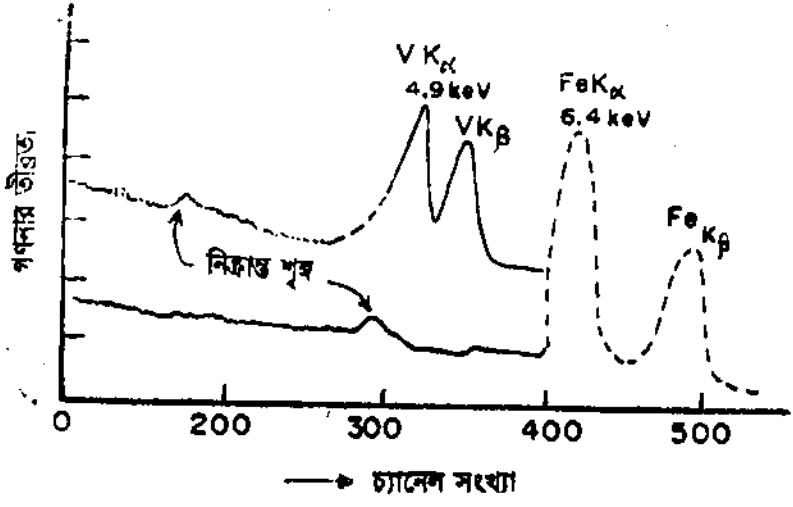


চিত্র ৩.১ : Si(Li) সন্ধায়ীর সংকেত স্পন্দের অগ্রধারের (leading edge) সরলীকৃত রূপায়ন (representation)। সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকায় মিথস্ক্রিয়াস্থলের পার্থক্যের জন্য স্পন্দের অগ্রধারে পরিবর্তন ঘটে।

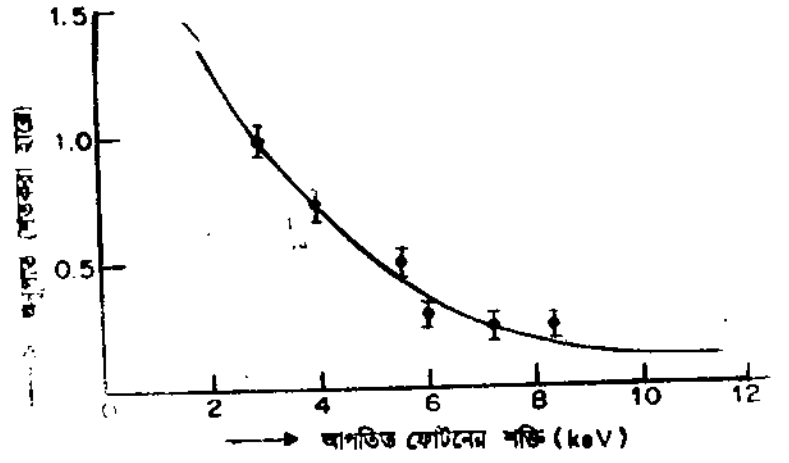
৩.৪ নিম্ন-শক্তি ফোটনের বর্ণালিবীক্ষণ (Low-energy photon spectroscopy, LEPS)

৩.৪.১ সিলিকন সন্ধায়ীর সাড়া ফাংশন : নিম্ন শক্তির ফোটনের ক্ষেত্রে (~55 keV এর নিচে) সিলিকনে ফটোতড়িৎ প্রক্রিয়া সংঘটনের সম্ভাবনা কম্পটন বিক্ষেপণের চেয়ে অধিকতর। 30 keV এর কম শক্তির ফোটনের ক্ষেত্রে সিলিকনে ফটোতড়িৎ শোষণ প্রবল থাকে, ফলে উদ্ভূত ফটোইলেকট্রনের দ্বারা সৃষ্ট পূর্ণশক্তির স্পন্দ শৃঙ্গটি Si(Li) সন্ধায়ীর সাড়া ফাংশনের উপর আধিপত্য বিস্তার করে থাকে। এমতাবস্থায় সন্ধায়ীতে প্রযুক্ত বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র পর্যাপ্ত প্রবল হলে তড়িৎ আধান পুরোপুরি সংগৃহীত হয় এবং পূর্ণশক্তির প্রতিনিধিত্বকারী স্পন্দ শৃঙ্গটি অনেকটা গাউসীয়ান (Gaussian) রেখাচিত্রের আকারে হয়ে থাকে। স্মর্তব্য যে, অনেক ফটোতড়িৎ প্রক্রিয়াস্তেই ইলেকট্রনের কক্ষীয় খোলকে এর পরিত্যক্ত আয়গা থেকে সেখানে এর বন্ধন শক্তির সমশক্তির বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রে তাৎক্ষণিকভাবে নির্গত হয়। স্বল্প শক্তির আপতিত ফোটনের ক্ষেত্রে অধিকাংশ মিথস্ক্রিয়াই সন্ধায়ীর পৃষ্ঠের কাছাকাছি জায়গায় সংঘটিত হয়, তাই সেখানে উৎপন্ন বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রের

সন্ধায়ী থেকে নিষ্ক্রমণের পরিমাণ বেশ গুরুত্ববহ হতে পারে। ফলে সিলিকন সন্ধায়ীর সাড়া ফাংশনে পূর্ণশক্তির (full-energy) স্পন্দ থেকে 1·8 keV নিচে সিলিকনের বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রের শক্তি বরাবরে একটি এক্স-রে নিষ্ক্রমণ স্পন্দ শৃঙ্গ আবির্ভূত হবে (চিত্র ৩.২)। ৩.৩ চিত্রে একটি সমতলীয় Si(Li) সন্ধায়ী



চিত্র ৩.২ : শক্ত উচ্চতা বর্ণালীর উপরের অংশ ^{51}Cr ও ^{57}Co রেডিওআইসোটোপদ্বয়ের K এক্স-রে স্পন্দশৃঙ্গ দেখাচ্ছে। সিলিকন এক্স-রের নিষ্ক্রান্ত স্পন্দশৃঙ্গও দেখা যাচ্ছে।

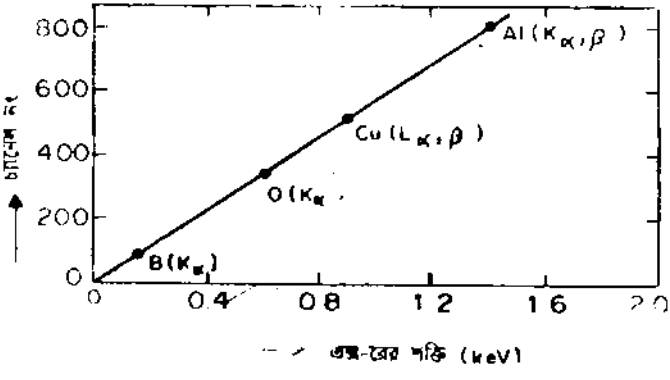


চিত্র ৩.৩ : একটি সমতলীয় Si(Li) সন্ধায়ীর এক্স-রে নিষ্ক্রান্ত স্পন্দশৃঙ্গ ও পূর্ণশক্তি স্পন্দশৃঙ্গের অধীন ক্ষেত্রফলের অনুপাত।

থেকে নিষ্ক্রান্ত স্পন্দ শৃঙ্গের তীব্রতা প্রদর্শন করা হলো। তদসদৃশ নিষ্ক্রান্ত স্পন্দ শৃঙ্গ জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে অধিকতর প্রবল হয় কেননা নিম্নশক্তির ফোটনের অন্তর বিদারণ দূরত্বের কারণে এবং জার্মানিয়ামের বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রে ফোটনের উচ্চতর শক্তির (11 keV) দরুন নিষ্ক্রমণের সম্ভাব্যতা উচ্চতর হয়ে থাকে।

উচ্চতর গামাশক্তির ক্ষেত্রে কম্পটন বিক্ষেপণের গুরুত্বপূর্ণ অবদানের দরুন বর্ণালীতে অবিচ্ছিন্নতা ভর করে। এ অবিচ্ছিন্নতার আকার জানতে হলে বন্ধন শক্তির প্রভাব অবশ্যই বিবেচনায় আনতে হবে। Si(Li) সন্ধায়ীর নিম্ন ফটো-তড়িৎ মিথস্ক্রিয়ার দরুন 150 keV এর অধিক শক্তির ফোটন সন্ধানের জন্য সচরাচর এদের ব্যবহার করা হয় না।

৩.৪.২ সাড়া ফাংশনের রৈখিকতা ও শক্তি পৃথককরণ : Si(Li) সন্ধায়ীতে প্রযুক্ত বিভব যদি এমন পর্যাপ্ত প্রবল (250 V/mm) হয় যে তড়িৎ আধানের ফাঁদে পড়া বা পুনর্মিলনের জন্য তেমন অপচয় ঘটবে না তাহলে নিম্ন শক্তির এক্স-রে ও গামারশ্মির সাড়া ফাংশন পুরোপুরি রৈখিক হয়ে থাকে। প্রোটন উত্তেজননে (excitation) উৎপাদিত কতিপয় বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রে শক্তি স্পন্দ শৃঙ্গ বনাম পর্যবেক্ষণে প্রাপ্ত চ্যানেল নাম্বার প্লটের (plot) আকারে ৩.৪ চিত্রে দেখানো হলো ; নিম্ন শক্তিতে প্রদর্শিত এ ক্ষেত্রে সম্ভাব্য সর্বোচ্চ শতকরা একভাগ অরৈখিকতা রয়েছে।



চিত্র ৩.৪ : Si(Li) সন্ধায়ী ব্যবহার করে স্পন্দ উচ্চতা বনাম এক্স-রে শক্তির পরীক্ষণে নিরূপিত রৈখিকতা।

উচ্চ পৃথককরণ ক্ষমতাধারী Si(Li) সন্ধায়ীর 5 — 280 keV শক্তি পরিসরে শক্তি পৃথককরণ ও নয়েজ বৈশিষ্ট্য নিয়ে সি. হলস্টেনের গবেষণায় প্রাপ্ত ফলাফল ৩.৫ চিত্রে দেখানো হলো। পূর্ণশক্তির স্পন্দ শৃঙ্গের সর্বোচ্চের অর্ধেকে পর্যবেক্ষিত

পূর্ণবিস্তার W_T কে কতিপয় স্বতন্ত্র উপাদানের বর্গের গঠনে প্রকাশ করা যায়, যথা :

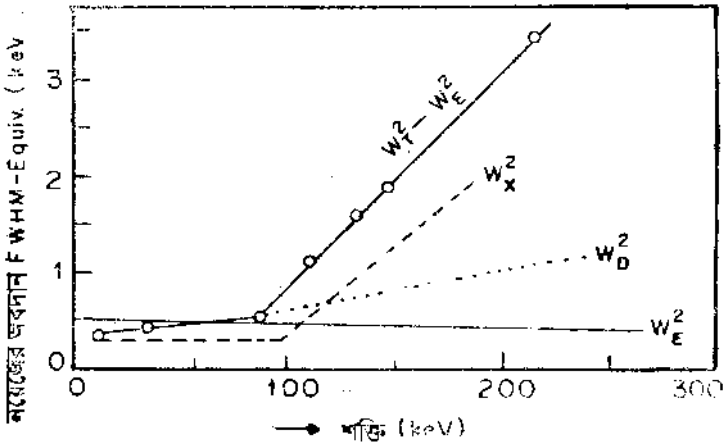
$$W_T^2 \rightarrow W_E^2 + W_D^2 + W_X^2$$

যেখানে $W_E \rightarrow$ FWHM সম নয়েজ যা ইলেকট্রনিক উপাদান থেকে উদ্ভূত হয়।

$W_D \rightarrow$ FWHM-সম বিস্তার যা সন্ধায়ীতে তড়িৎ আধান উৎপাদনের পরিসংখ্যান থেকে উদ্ভূত হয়, একে $W_D^2 = 2.35^2 \epsilon F E$ ধরা হয়ে থাকে। এখানে $\epsilon \rightarrow$ এক জোড়া ইলেকট্রন-হোল উৎপাদনে ব্যয়িত শক্তি, $F \rightarrow$ ফানো ফ্যাক্টর আর 'E' ফোটনের শক্তি নির্দেশ করে থাকে।

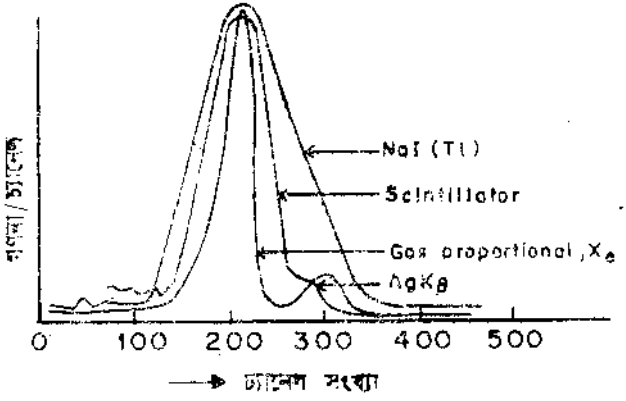
$W_X \rightarrow$ সন্ধায়ীতে তড়িৎ আধান সংগ্রহ সংক্রান্ত সমস্যা যা লীক বিদ্যুতের, FWHM-সম হয়ে থাকে।

ক্ষুদ্র পৃষ্ঠ এলাকাধারী সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে শক্তি পৃথককরণ উন্নয়নের পরীক্ষণে FWHM এর মান 100 eV নির্ধারিত হয়েছে। ৩০০ বর্গ মি. মি. এর পৃষ্ঠ এলাকাধারী বাণিজ্যিকভাবে প্রাপ্ত Si(Li) সন্ধায়ীর ^{55}Fe থেকে এক্স-রের 5.9 keV তে পরিমাপিত শক্তি বিস্তার পাওয়া গেছে 2.55 eV। অধুনা ডাবল গার্ডরিং (double guardring) গঠন দ্বারা পৃষ্ঠ লীক বিদ্যুৎ প্রবাহ হ্রাস, FET কে ঠাণ্ডা করে পূর্ব-পরিবর্ধকের নয়েজ হ্রাস ও নিম্ন নয়েজের স্পন্দিত আলোকীয় পুনর্গমন পূর্বপরিবর্ধক (Feed back preamplifier) ব্যবহারে শক্তি পৃথককরণে অনেক উন্নয়ন সাধিত হয়েছে।



চিত্র ৩.৫ : Si(Li) ফোটন স্পেকট্রোমিটার থেকে প্রাপ্ত পূর্ণশক্তি স্পন্দশব্দের সামগ্রিক বিস্তারে বিভিন্ন নয়েজ উৎসের অবদান।

৩.৬ চিত্রে এক্স-রে বর্ণালিবীক্ষণে সাধারণত ব্যবহৃত তিনটি বিভিন্ন ধরনের শক্তি পৃথককরণের তুলনামূলক ছক চিত্র প্রদর্শিত হলো। এ ধরনের প্রয়োগে Si(Li) সন্ধায়ীর সচরাচর উত্তম শক্তি পৃথককরণ ক্ষমতা সমানুপাতিক বা সিন্টিলেটর সন্ধায়ীর চেয়ে বহু গুণে উন্নততর পৃথককরণে সহায়তা করে।



চিত্র ৩.৬ : রূপা থেকে প্রাপ্ত K-অনুক্রমিক এক্স-রের স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালী যা বিভিন্ন শক্তি পৃথককরণ ক্ষমতার তিনটি ভিন্ন ধরনের সন্ধায়ী দ্বারা রেকর্ড করা হয়েছে।

৩.৪.৩ Si(Li) সন্ধায়ীর সন্ধান দক্ষতা : নীতিগতভাবে যে কোনো Si(Li) সন্ধায়ীর পূর্ণশক্তি স্পন্দ শূন্য দক্ষতা এর আয়তন এবং আকৃতিসহ গামারশ্মির মিথস্ক্রিয়ার প্রস্থচ্ছেদের (cross -section) জ্ঞান থেকে নিরূপণ করা যায়। বাস্তবক্ষেত্রে উৎপাদনকারী প্রায় সময়ই সন্ধায়ীর মাপ যেমন দৈর্ঘ্য, প্রস্থ, বেধ, আয়তন, ইত্যাদি মাত্রা উল্লেখ করেন এবং এগুলো প্রায়ই অনিশ্চিত হয় কেননা সক্রিয় এলাকার ধারে কাছে তড়িৎ আধান সংগ্রহ অসম্পূর্ণ হওয়ার প্রভাব এতে পড়ে। তদুপরি সন্ধায়ীকে তরল নাইট্রোজেনের তাপমাত্রায় ঠাণ্ডা রাখার জন্য বায়ুশূন্য হিমাধারের ভিতরে চড়ানো (mount) হয়। তাই বিকিরণ উৎস এবং সন্ধায়ীর মধ্যবর্তীস্থলের দূরত্ব যথাযথ নিরূপণ করা কঠিন। ফলে যুক্তি সঙ্গত নির্ভুল উপায়ও পেতে হলে সন্ধায়ীর কার্য সম্পাদন দক্ষতা সুষ্ঠুভাবে ক্রমাঙ্কিত বিকিরণ উৎস ব্যবহার করে পরীক্ষণের সাহায্যে নিরূপণ করা প্রয়োজন। একাজে অনেক জটিলতা রয়েছে কেননা Si(Li) সন্ধায়ীর কার্যকর শক্তি পরিসরে (5 – 50keV) বাস্তবে খুব অল্প সংখ্যক প্রমিত বিকিরণ উৎস পাওয়া যায়।

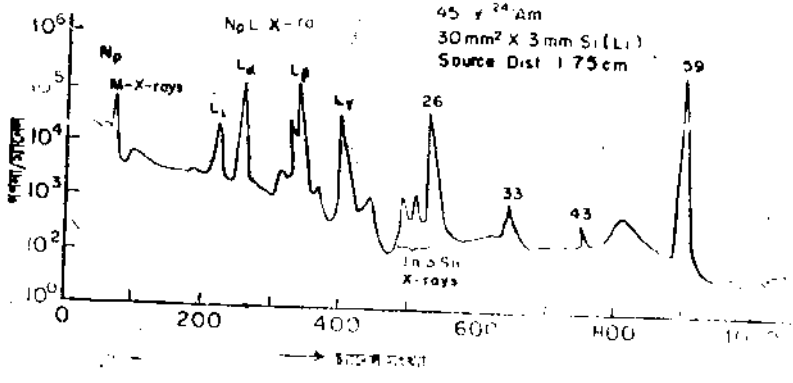
৪৫৮ বছর অর্ধায়ুবিশিষ্ট আলফা-সক্রিয় তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ ^{241}Am (আমেরিসিয়াম – 241) ক্রমাঙ্কনের কাজে একটি উপযোগী উৎস। দুটি

অপেক্ষাকৃত তীব্র গামারশ্মিসহ (26.35 ও 59.54 keV) ক্ষয় উৎপাদ Np থেকে কতিপয় L এক্স-রে নির্গত হয়ে থাকে (সারণি ৩.১) ৩.৭ চিত্রে Si(Li) সন্ধানী দিয়ে রেকর্ডকৃত বর্ণালী দেখানো হলো। একটি ক্রমাঙ্কিত ^{241}Am উৎস 10—60 keV শক্তি পরিসরে দক্ষতা ক্রমাঙ্কনে সহায়তা করতে পারে।

সারণি ৩.১ ^{241}Am এর প্রতিটি ভাঙ্গনে উদ্ভূত ফোটনের নিরূপিত তীব্রতা (intensity)

Line (রেখা)	শক্তি (keV)	প্রতিটি ভাঙ্গণে (disintegration) শতকরা হার
L_l	11.9	0.86 ± 0.03
L_α	13.9	13.2 ± 0.35
L_β	17.8	19.25 ± 0.60
L_γ	20.8	4.85 ± 0.20
γ	26.35	2.4 ± 0.10
γ	59·54	35.9 ± 0.60

পরম ক্রমাঙ্কিত উৎসের অভাবে বিকল্প ব্যবস্থা গ্রহণ করা যায়। যেমন, তীব্র উচ্চ শক্তির গামারেসহ K-এক্স-রে নির্গমনকারী তেজস্ক্রিয় আইসোটোপের ক্ষেত্রে (X/গামারশ্মি) পদ্ধতি ব্যবহার করা যায়। গামারশ্মির তীব্রতা পরমভাবে (abso-



চিত্র ৩.৭ : ৩০ (মি.মি.)² x ৩ মি.মি. Si(Li) সন্ধানী দ্বারা গৃহীত ^{241}Am এর ফোটন বর্ণালী।

lutely) মাপা গেলে ক্ষয় উপাত্ত থেকে এক্স-রের তীব্রতাও পরমভাবে নিরূপণ করা যায়। স্ট্যান্ডার্ড NaI(Tl) সিন্টিলেটর বা Ge(Li) সন্ধায়ী ব্যবহার করে নির্ভুলভাবে গামারশ্মির শক্তি নিরূপণ যে কোনো তেজস্ক্রিয় আইসোটোপ গবেষণাগারেই করা যায়। এ সকল উৎস তখন ৩.২ সারণিতে প্রদত্ত উপাত্ত থেকে এক্স-রের ক্রমাঙ্কন বিন্দু সরবরাহ করে। Si(Li) সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে উচ্চ শক্তির গামারশ্মির উপস্থিতি কোনো সমস্যা নয় কেননা মিথস্ক্রিয়ার সম্ভাব্যতা উপেক্ষণীয় পর্যায়েও নগণ্য হয়ে থাকে।

অন্যান্য কঠিন অবস্থার সন্ধায়ীর ন্যায় দীর্ঘকালীন ব্যবহারে সন্ধান দক্ষতায় অবনমনের সুস্পষ্ট প্রমাণ সিলিকন সন্ধায়ীর ক্ষেত্রেও পরীক্ষণে প্রমাণিত হয়েছে। তাই নির্দিষ্ট সময় অন্তে পুনরায় দক্ষতা ক্রমাঙ্কনের প্রয়োজন রয়েছে। আধান সংগ্রহের দক্ষতায় পরিবর্তন এবং অসক্রিয় স্তরের পুরুত্বের পরিবর্তনই এ জন্য দায়ী মনে করা হয়।

সারণি ৩.২ ঃ (X-ray/γ-ray) ক্রমাঙ্কন পদ্ধতিতে ব্যবহারের উপযোগী তেজস্ক্রিয় নিউক্লাইড (nuclide)।

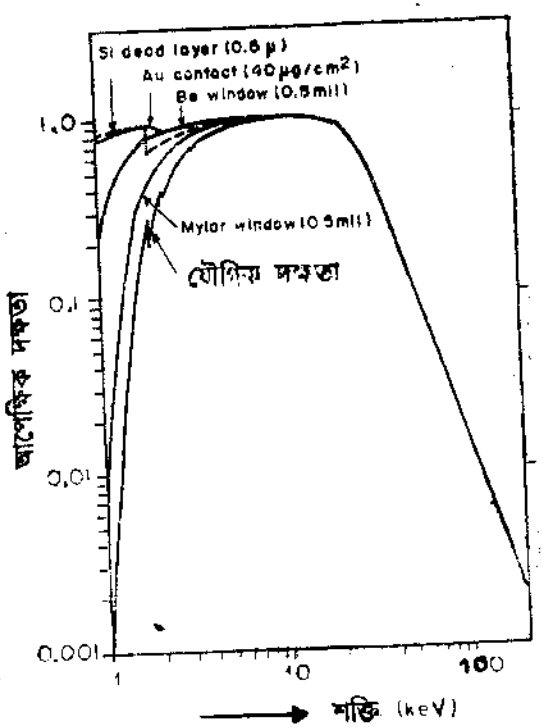
নিউক্লাইড (nuclide)	এক্স-রে বা নিম্ন শক্তির গামারশ্মির শক্তি (keV)	উচ্চ শক্তির গামা ফোটনের শক্তি (keV)	তীব্রতার অনুপাত (X/γ)
^{54}Mn	5.47 ($K_{\alpha\beta}$)	834.8	0.2514 (± 0.5 %)
^{57}Co	6.40 (K_{α})	122.1	0.5727 (± 2.0 %)
^{65}Zn	14.41 (γ)	—	0.112 (± 1.8 %)
	8.04 (K_{α})	1115.5	0.6596 (± 0.8 %)
^{88}Y	14.12 (K_{α})	898.0	0.5491 (± 1.2 %)
	15.85 (K_{β})	—	0.0989 (± 1.9 %)
^{109}Cd	22.10 (K_{α})	88.0	22.0 (± 4.9 %)
	25.0 (K_{β})	—	4.68 (± 5.0 %)

^{137}Cs	32.1 (K_α)	661.6	0.0666 ($\pm$ 3.0 %)
	36.6 (K_β)	—	0.0159 ($\pm$ 3.1 %)
^{198}Au	70.15 (K_α)	411.8	0.0229 ($\pm$ 2.3 %)
	80.7 (K_β)	—	0.00635 ($\pm$ 2.4 %)
^{203}Hg	72.11 (K_α)	279.2	0.1247 ($\pm$ 2.1 %)
	83.0 (K_β)		0.0348 ($\pm$ 2.5 %)

প্রতিনিধিত্বমূলক একটি Si(Li) সঙ্কায়ীর শক্তি নির্ভরশীল দক্ষতা ৩.৮ চিত্রে দেখানো হলো। আপতিত বিকিরণ শক্তির এক উল্লেখযোগ্য পরিসরে (7—20 keV) সঙ্কায়ীর সহজাত স্পন্দশূন্য দক্ষতা প্রায় শতকরা 100 ভাগের অতি কাছাকাছি হয়ে থাকে। এটিই সে শক্তি পরিসর যাতে কার্যত সকল আপতিত ফোটনই সাধারণ ফটো-তড়িৎ শোষণ প্রক্রিয়ায় শোষিত হয়। পরম গণনা দক্ষতা এমতাবস্থায় সঙ্কায়ীর পৃষ্ঠ ক্ষেত্রফলের উপর প্রাথমিকভাবে নির্ভর করে। ফলে কার্যত এ ধরনের সকল নিম্ন শক্তির ফোটন সঙ্কায়ীর পৃষ্ঠ ক্ষেত্রফল সর্বোচ্চ করার জন্য সমতলীয় জ্যামিতিতে নির্মাণ করা হয়ে থাকে। উচ্চতর শক্তির ফোটনের ক্ষেত্রে দক্ষতা দ্রুত হ্রাস পেতে থাকে ; এতে সিলিকনে তাদৃশ ফটো-তড়িৎ প্রস্থচ্ছেদের হ্রাসের প্রতিফলন ঘটে। অপেক্ষাকৃত অধিকতর পুরু সঙ্কায়ী কিছুটা কাজ দিলেও সমতলীয় সঙ্কায়ীসমূহ 100 keV এর নিচেই সীমাবদ্ধ থাকে।

নিম্ন শক্তির ফোটনের জন্য দক্ষতা ক্রান্তিগতভাবেই জানালার পুরুত্ব বা সঙ্কায়ী ও ছিদ্রাধারের সাথে সংযুক্ত অসক্রিয় স্তরের (dead layer) উপর নির্ভরশীল। অত্যন্ত দুর্বল বিকিরণের জন্য উৎস ও সঙ্কায়ীর মধ্যবর্তীস্থলে বিদ্যমান কয়েক সেন্টিমিটার বাতাসও উল্লেখযোগ্য পরিমাণ তীব্রতা হ্রাস ঘটায়। ৩.৮ চিত্রে প্রতিটি নমুনাগত জানালাও অসক্রিয় স্তরের স্ব স্ব প্রেরণ দক্ষতা পৃথক পৃথকভাবে এবং যৌগিকভাবে (composite) দেখানো হয়েছে। 1.8 keV শক্তিতে যে বিচ্ছিন্নতা দেখা যায় তা সিলিকনের অসক্রিয় স্তরের K-শোষণ (K-absorption) ধারের

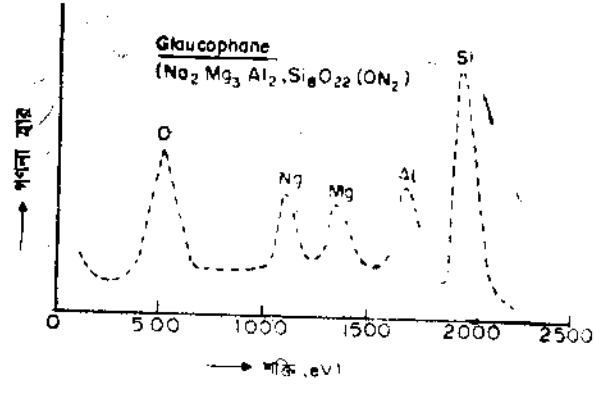
জন্য বটে। জ্ঞাত পরম উৎপাদন (yield) বিশিষ্ট পৃথক পৃথক উৎস ব্যবহার করে সন্ধায়ীর অসক্রিয় স্তরের পুরুত্ব বাস্তবে নিরূপণ করা যায়। এক্স-রে শক্তি পরিসরের প্রায় সবটুকু জুড়েই সিলিকনের সন্ধান দক্ষতা তুলনামূলকভাবে ভালো তাই Si(Li) সন্ধায়ী এই শক্তি পরিসরের ফোটনের জন্য ব্যাপকভাবে প্রয়োগ করা হয়; নিম্ন প্রতিপ্রভা উৎপাদন (5%) K-ধারের (K-edge) নিম্ন শক্তির কারণে বৈশিষ্ট্যমূলক নিষ্ক্রমণের প্রভাব সিলিকনে গুরুতর নয়। ফটোশৃঙ্গ দক্ষতায় 1.8 keV তে যে সামান্য বিনতি (dip) দেখা যায় তা তেমন স্পষ্ট হয় না।



চিত্র ৩.৮ : ৩ মি.মি. পুরু Si(Li) সন্ধায়ীর জন্য পূর্ণ শক্তি শৃঙ্গের তত্ত্বীয়ভাবে প্রাপ্ত দক্ষতা।

৩.৪.৪ প্রতিপ্রভা বর্ণালিবীক্ষণে Si(Li) সন্ধায়ীর প্রয়োগ : 1—50 keV শক্তি পরিসরের এক্স-রে বর্ণালী পরিমাপনে শীতলীকৃত সমতলীয় Si(Li) সন্ধায়ীর ব্যাপক প্রয়োগ প্রচলিত রয়েছে। নয়েজ মাত্রা নিম্ন পর্যায়ে রাখার জন্য পূর্বপরিবর্ধককেও ঠাণ্ডা করা হয় এর তাপায়নজনিত নয়েজ হ্রাস করার জন্য।

বিভিন্ন উপায়ে উত্তেজননের বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রে উৎপাদন করে বস্তু বিশ্লেষণ করে উৎপাদনের পরিমাণ নিরূপণ তথা শনাক্তকরণে সিলিকন সন্ধায়ী ব্যবস্থা পদ্ধতির ব্যাপক প্রয়োগ রয়েছে। কোনো সুনির্দিষ্ট উপাদানের নমুনাকে এর K-খোলকের শক্তির অধিকতর শক্তিসম্পন্ন এক্স-রে ফোটন দ্বারা বিকিরণকরণ করলে ফটো-তড়িৎ শোষণের ফলে বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রে নির্গমন আবিষ্ট হয়; এ প্রক্রিয়াকে এক্স-রে প্রতিপ্রভা (X-ray fluorescence) বলা হয়। উত্তেজননের অন্যান্য উপায়ের মধ্যে রয়েছে আলফা, ইলেকট্রন বা অন্য কোনো আধানযুক্ত কণিকা প্রবাহ বর্ষণ (bombard)। কোনো মিশ্র নমুনায় বিদ্যমান উপাদনসমূহকে আলাদা করা যায় এবং স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালীতে এদের নিজনিজ বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রে খুঁজে বের করা যায়। উদাহরণস্বরূপ ইলেকট্রন বর্ষণে উত্তেজিত একটি নমুনার এক্স-রে বর্ণালী ৩.৯ চিত্রে দেখানো হলো। বোরনের মত হাল্কা উপাদানের বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রে (183eV, Kα শক্তি) সন্ধানের প্রতিবেদন রয়েছে।



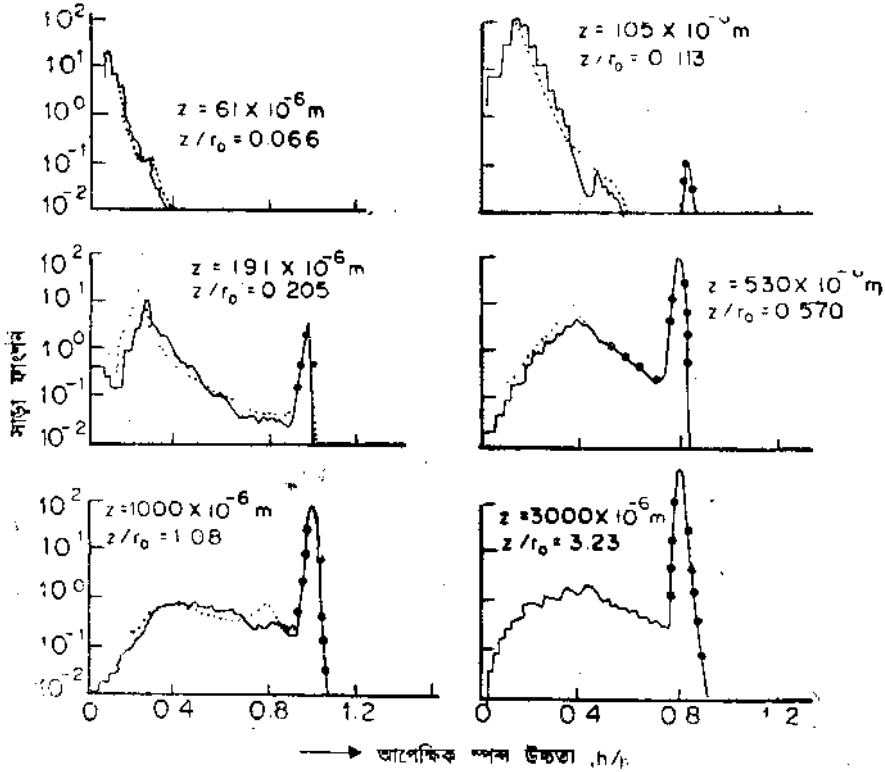
চিত্র ৩.৯ : খনিজ পদার্থ glaucophane কে ইলেকট্রন বর্ষণে উত্তেজিত করে উৎপাদিত এক্স-রে বর্ণালী। বর্ণালীতে খনিজটির প্রতিটি উপাদানই স্পন্দশক্তের মাধ্যমে শনাক্ত করা যাচ্ছে।

৩.৫ সিলিকন সন্ধায়ী দ্বারা ইলেকট্রন বর্ণালিবীক্ষণ

লিথিয়াম তাড়িত সিলিকন সন্ধায়ী ইলেকট্রনের শক্তি নিরূপণেও বেশ উপযোগী। দৈনন্দিন কাজে ব্যবহৃত ইলেকট্রন বা বিটা কণিকার সর্বোচ্চ বিদারণ দূরত্বের চেয়ে সুলভে অনেক বেশি পুরুত্বের সিলিকন সন্ধায়ী পাওয়া যায়। তুলনামূলকভাবে সিলিকনের নিম্ন পারমাণবিক সংখ্যা পৃষ্ঠে আপতিত ইলেকট্রনের ন্যূনতম পেছন দিকে

বিক্ষেপণও নিশ্চিত করে। যেহেতু সন্ধায়ীটি সচরাচর বায়ুশূন্য হিমাধারে আবদ্ধ থাকে তাই বাইরে থেকে আপতিত কোনো ইলেকট্রনকে হিমাধারের প্রবেশ জানালা ভেদ করে যেতে হয় এবং এ প্রক্রিয়ায় উল্লেখযোগ্য পরিমাণ শক্তির অপচয় ঘটে থাকে। নিম্ন শক্তির ইলেকট্রনের বর্ণালিবীক্ষণে নমুনাটিকে বাতাসে ও জানালায় শক্তি অপচয় পরিহার করার জন্য বায়ুশূন্য এনভেলোপে (envelope) প্রবেশ করিয়ে দিতে হবে।

0.15 – 5.0MeV শক্তি পরিসরে সমশক্তির ইলেকট্রনের প্রতি সিলিকন সন্ধায়ীর সাড়া মি. বার্গার প্রমুখ পরীক্ষামূলকভাবে ও তত্ত্বীয়ভাবে এ উভয় উপায়ে অনুসন্ধান করেছেন। নমুনাগত স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালীর একটি সেট ৩.১০ চিত্রে দেখানো হলো। সন্ধায়ীর পুরুত্ব ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ বিদারণ দূরত্বের চেয়ে বৃহত্তর হলে সাড়া ফাংশনে পূর্ণ শক্তির স্পন্দ শৃঙ্গসহ নিম্ন বিস্তারের সংঘটনের নিরবচ্ছিন্ন (continuum) স্পন্দ শৃঙ্গ আবির্ভূত হয়। পূর্ণ শক্তি স্পন্দ শৃঙ্গটি আবির্ভূত হয় সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকায়



চিত্র ৩.১০ : 0.50 MeV ইলেকট্রনের জন্য সিলিকন সন্ধায়ীর পরীক্ষণ ও তত্ত্বীয় সাড়া ফাংশন পরীক্ষণলব্ধ উপাত্ত বিন্দু দ্বারা চিহ্নিত করা হয়েছে।

সম্পূর্ণরূপে থেমে যাওয়া ইলেকট্রনের ও তাদের ট্র্যাকে উৎপাদিত ব্রেমস্‌স্ট্রালুং-সমূহের পূর্ণ শোষণের ফলে। বর্ণালীর নিরবচ্ছিন্ন বিস্তৃতি আংশিক শক্তিক্ষয় ঘটেছে এমন সংঘটন দ্বারা গড়ে উঠে; এ সংঘটনগুলি ঘটে হয় ইলেকট্রনের পেছনদিকে বিক্ষপণের পর পুনর্বহিগমনের কারণে অথবা ব্রেমস্‌স্ট্রালুংয়ের নিষ্ক্রমণের দরুন। সন্ধায়ীকে যতই দুর্বল করা হয় ততই অধিকতর সংখ্যায় ইলেকট্রন সম্পূর্ণ শক্তি সন্ধায়ীতে জমা না দিয়ে অতিক্রম করে চলে যেতে থাকে এবং বর্ণালীতে সংশ্লিষ্ট স্পন্দটি পূর্ণ শক্তি স্পন্দশৃঙ্গ থেকে নিম্নতর শক্তি স্তরে নেমে আসে। যে Si(Li) সন্ধায়ীতে সহজাত পুরুত্ব ইলেকট্রনের সর্বোচ্চ বিদারণ দূরত্বের চেয়ে বৃহত্তর তা অবশ্যই একটি অত্যন্ত উপযোগী ইলেকট্রন স্পেকট্রোমিটার।

———

চতুর্থ অধ্যায়

উচ্চ বিশুদ্ধ জার্মানিয়াম ও অন্যান্য অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী

(High Purity Germanium (HpGe) and other Semiconductor Detectors)

৪.১ ভূমিকা

100 keV এর কাছাকাছি এবং তদূর্ধ্ব শক্তির গামারশ্মির বর্ণালিবীক্ষণে সিলিকনের চেয়ে জার্মানিয়াম অধিকতর কার্যকর ও পারদর্শী। সচরাচর বিশুদ্ধ অর্ধপরিবাহী জার্মানিয়াম ব্যবহারে তৈরি স্বাভাবিক জংশন সন্ধায়ীতে অল্প কয়েক মিলিমিটারের অধিক গভীরতার বাহকশূন্য (carrier depleted) অঞ্চল পাওয়া সম্ভব হয় না। সুতরাং লিথিয়াম তাড়িত প্রক্রিয়া উন্নয়ন করা হয়েছে 10—15 মি. মি. পুরুত্বের সহজাত জোন (zone) কৃত্রিমভাবে সৃষ্টির জন্য। তাই এসব Ge(Li) সন্ধায়ীর আয়তন এমন পর্যাপ্ত বড় করা যায় যেন এদের অধিকাংশ ক্ষেত্রে গামা-রশ্মির বর্ণালিবীক্ষণে ব্যবহার করা যায়।

Ge(Li) সন্ধায়ীর একটি প্রধান ব্যবহারিক অসুবিধা হচ্ছে গৃহ তাপমাত্রায় লিথিয়াম আয়নের স্থানগত ব্যাপন (diffusion) স্থিতিহীন (unstable) হয়ে পড়ে। ফলে লিথিয়ামের পুনরায় ব্যাপনে সহজাত অঞ্চলে বাহক প্রতিবিধানে মারাত্মক বিপর্যয় ঘটে। তরল নাইট্রোজেনের তাপমাত্রার চেয়ে সামান্য উচ্চ তাপমাত্রায়ই বিপর্যয় ঘটে। তাই বিশাল আয়তনের নাইট্রোজেনের ডিওয়ার (dewar) ব্যবহার করে সন্ধায়ীকে সদাসর্বদাই হ্রাসকৃত তাপমাত্রায় রাখা অবশ্যই প্রয়োজন। তরল নাইট্রোজেনের এ পাত্রে নির্দিষ্ট সময়ান্তে পুনরায় তরল নাইট্রোজেন ভরার বাধ্যবাধকতা (obligation) ব্যবহারকারীর উপর উল্লেখযোগ্য চালনাগত অসুবিধা ও খরচের বোঝা চাপিয়ে দেয়। লিথিয়াম আয়ন-তাড়িত সন্ধায়ীকে কোনো একবার ঠাণ্ডা রাখতে ব্যর্থ হলে পুনরায় লিথিয়াম আয়ন-তাড়নের জন্য একে উৎপাদনকারীর কারখানায় ফেরৎ পাঠিয়ে মেরামত করে আনতে হয়; এ প্রক্রিয়া সময় সাপেক্ষ, ব্যয়বহুল এবং প্রায়শই সন্ধায়ীটিকে আদি কার্যসম্পাদন (performance) অবস্থায় ফিরিয়ে আনা সম্ভব হয় না। নিরবচ্ছিন্নভাবে ঠাণ্ডা রাখতে হয় বলে Ge(Li) সন্ধায়ীকে অনেক প্রয়োগ ক্ষেত্রেই কাজে লাগানো যায় না। তাই গৃহতাপে সংরক্ষণ/ব্যবহার করা যায় এমন ধরনের অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী উদ্ভাবনের নিরবচ্ছিন্ন প্রয়াস বহুদিন ধরেই চলছে। এ প্রচেষ্টার ফলে সচরাচর উচ্চ নিখাদ অবস্থার জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর সন্ধান মিলেছে। স্মর্তব্য যে, এ পুস্তকের প্রথম অধ্যায়ে (১.১১) ও (১.১২)

সমীকরণে দেখা গেছে যে স্বাভাবিক একটি p-n জংশনের বাহকবিক্ত অঞ্চলের গভীরতা কোনো প্রযুক্ত বিভবে সংশ্লিষ্ট পদার্থটির রোধকত্বের বর্গমূলের অনুপাতে বৃদ্ধি পেয়ে থাকে। জার্মানিয়ামে অপদ্রব্যের গাঢ়ত্ব 10^{10}টি পরমাণু প্রতি ঘন সেন্টিমিটারে (cm^{-3}) হ্রাস করা গেলে তদনুযায়ী (corresponding) রোধকত্বও এমন পর্যাপ্ত হয় যে 1,000 ভোল্টের নিচে বিমুখী ঝোঁক (reversed bias) প্রয়োগেও 10 মিলিমিটার গভীর বাহকবিক্ত অঞ্চল পাওয়া যায়। সুতরাং লিথিয়াম প্রতিবিধান (compensation) পদক্ষেপ ছাড়াই এমতাবস্থায় Ge(Li) সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে প্রাপ্ত তুলনীয় সক্রিয় সন্ধান এলাকা অর্জন করা সম্ভব। বিপুলায়তন এ সকল ডায়োড সন্ধায়ীসমূহকে (diode detectors) সহজাত জার্মানিয়াম' বা উচ্চ মাত্রার বিশুদ্ধ জার্মানিয়াম (high purity germanium, সংক্ষেপে HpGe) সন্ধায়ী বলা হয়। অতি সম্প্রতি এরা গামারশ্মি 'স্পেকট্রোমিটার' হিসেবে ব্যাপকভাবে ব্যবহৃত হয়ে চলেছে।

অতি অল্প পর্যায়ের অপদ্রব্য যেমন 10^{10} সংখ্যক পরমাণু/(সে. মি.)^2 (10^{-6} অংশ প্রতি মিলিয়নে (parts per million) (ppm)) অর্জন করতে হলে সন্ধায়ী প্রস্তুতিতে ব্যবহৃত জার্মানিয়াম কেলাস উৎপাদনে অতি অসাধারণ বিশুদ্ধকরণ পদ্ধতি অবলম্বন করতে হবে। এভাবে উদ্ভূত জার্মানিয়াম অতি উচ্চ মাত্রায় বিশুদ্ধ ও পুরাপুরি বিশিষ্ট বস্তু হয়ে থাকে। এমন অতি উচ্চ বিশুদ্ধ পদার্থের অর্ধপরিবাহীর ধর্ম p-ধরনের ঝোঁকগ্রস্ত হয়ে থাকে। এর কারণ হয় (either) গ্রাহক অপদ্রব্যের (যেমন অ্যালুমিনিয়াম) অবশেষের উপস্থিতি অথবা (or) জার্মানিয়ামের নিজেরই ল্যাটিস খুঁতের সাথে সংযুক্ত গ্রাহক কেন্দ্রের (acceptor center's) কারণে। অধুনা অপদ্রব্যের পরিমাণ হ্রাসকরণে এমন পর্যাপ্ত পরিমাণ উন্নতি সাধিত হয়েছে যে জার্মানিয়ামের বৈদ্যুতিক ধর্মাবলী প্রায় ক্ষেত্রেই গাঠনিক খুঁতের দ্বারাই নিয়ন্ত্রণ করা যায় (R. G. Musket, Nucl, Instr and Methods, 117, 385 (1974))।

মাত্রাতিরিক্ত লীক বিদ্যুৎপ্রবাহের দরুন বিশুদ্ধ জার্মানিয়াম সন্ধায়ীসমূহের গৃহ-তাপমাত্রায় ব্যবহারে বিঘ্নের সৃষ্টি করে কিন্তু লিথিয়াম প্রতিবিধানের অনুপস্থিতিতে এ ধরনের সন্ধায়ীকে ব্যবহারের মধ্যবর্তী সময়কালে ঠাণ্ডা অবস্থায় না রাখলেও ক্ষতির সম্ভাবনা আদৌ নেই। বহু সংখ্যক বার পুনঃপুনঃ উষ্ণ ও ঠাণ্ডা চক্রের (cycles) পরও বিশুদ্ধ জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর সফল পরিচালনার প্রতিবেদন ঢের রয়েছে। তথাপিও অনেক উৎপাদনকারী সন্ধায়ীর বায়ুশূন্য ব্যবস্থায় থেকে যাওয়া অবশেষ জলীয় বাষ্প দ্বারা সন্ধায়ীর পৃষ্ঠ বিদূষণের সম্ভাবনা পরিহারের জন্য একে নিরবচ্ছিন্নভাবে তরল নাইট্রোজেনের তাপমাত্রায় রাখার পরামর্শ দিয়ে থাকেন। বহনযোগ্য ব্যবহারের জন্য সচরাচর ব্যবহৃত তরল নাইট্রোজেনের ডিওয়ারকে যান্ত্রিকভাবে আবদ্ধ-চক্রের (mechanicaly closed cycle) রিফ্রিজারেটর দ্বারা প্রতি-স্থাপন করা চলে। কেননা যে কোনো কারণে শৈত্যায়নে বিঘ্ন ঘটলেও ক্ষতির সম্ভাবনা

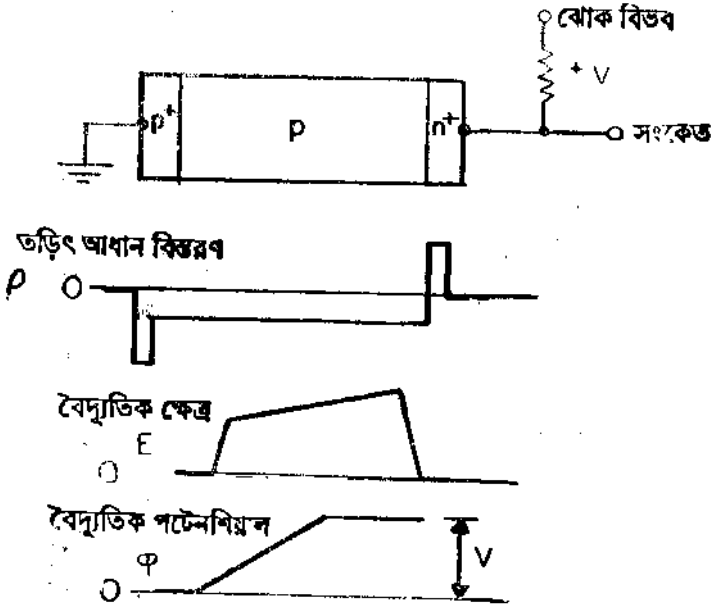
আদৌ নেই। অতি বিশুদ্ধ জার্মানিয়াম সন্ধায়ীকে তরল নাইট্রোজেনের তাপমাত্রায় চালনা করার প্রচলন থাকলেও ,কানো কোনো প্রয়োগ ক্ষেত্রে 77°K এর উপরের তাপমাত্রায় চালালে বেশি সুবিধা লাভ ঘটে। বেশ কতিপয় পরীক্ষণে দেখা গেছে যে 150—180° K এর মত উচ্চ তাপমাত্রায় সর্বাধিক সন্তোষজনক কার্য সম্পাদন (performance) পাওয়া যায়। এর প্রধান কারণ হচ্ছে ফাঁদে আটকানোর (trapping)প্রভাব বৃদ্ধি ও ব্যান্ড থেকে ব্যান্ডে বিপুল পরিমাণ লীক বিদ্যুৎ প্রবাহজনিত নয়েজ বৃদ্ধি।

৪.২ অতি বিশুদ্ধ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর সাধারণ বৈশিষ্ট্য

উচ্চ বিশুদ্ধ জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর মৌলিক উপাদানসমূহ ৪.১ চিত্রে দেখানো হলো। যেহেতু উচ্চ বিশুদ্ধ পদার্থের বিপুল অংশই p-ধরনের তাই এ ধরনের অবস্থান-অবস্থাকে প্রায়ই n^+-p-p^+ ডায়োড গঠনরূপে উল্লেখ করা হয়ে থাকে (+ চিহ্নটি উচ্চ ডোপিত পদার্থ বুঝায়)। n^+ সংযোগটি সচরাচর উচ্চ তাপমাত্রায় কিছু সময়ের ব্যাপনান্তে জার্মানিয়ামের অধিস্থাপিত (lapped) পৃষ্ঠদেশে লিথিয়াম ধাম্পীভবনের দ্বারা প্রস্তুত করা হয়। সন্ধায়ীর বাহকরিক্ত অঞ্চলটিকে বিমুখী ঝোঁকগ্রস্ত করে n^+-p জংশন সৃষ্টি করা হয়। বিপরীত প্রান্তের সংযোগটি প্রবান বাহকের জন্য একটি ননইনজেকটিং (noninjecting) সংযোগ হতে হয় এবং এটি ধাতু-থেকে-অর্ধপরিবাহী (metal-to-semiconductor) পৃষ্ঠবাঁধ জংশনে গঠিত বলে p^+ সংযোগরূপে কাজ করে। n^+ লিথিয়াম সংযোগের সাথে সংযুক্ত অসক্রিয় স্তরটি পৃষ্ঠবাঁধের সাথে সংযুক্ত অসক্রিয় স্তরের চেয়ে সর্বদাই বৃহত্তর হয় তাই সন্ধায়ীকে যখন সামগ্রিকভাবে বাহক রিক্ত (depleted) করা হয় তখন p^+ পৃষ্ঠকেই প্রবেশ জানালা হিসেবে ব্যবহার করা হয়। অত্যন্ত পাতলা প্রবেশ জানালা দরকার হলে আয়ন প্রোথিতকরণ প্রযুক্তি ব্যবহার করে p^+ সংযোগটি সৃষ্টি করা যেতে পারে।

বিমুখী ঝোঁকগ্রস্ত করার জন্য p^+ পৃষ্ঠের আপেক্ষিকে n^+ সংযোগে ধন বিভব প্রয়োগের দরকার হয়। বাহকরিক্ত অঞ্চলটি কার্যকরভাবে শুরু হয় কেন্দ্রীয় অঞ্চলের n^+ কিনারা থেকে এবং বিভব বৃদ্ধির সাথে p-অঞ্চলে আরো দূরে প্রসারিত হয়ে থাকে। প্রযুক্ত বিভবকে পর্যাপ্ত উচ্চ করলে সন্ধায়ীটি পুরাপুরিভাবে বাহকরিক্ত হয়ে পড়ে ; ফলে সক্রিয় এলাকাটি এক সংযোগস্থল থেকে অন্য সংযোগস্থল পর্যন্ত বিস্তৃত হয়ে পড়ে। এমতাবস্থায় বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রটি p-অঞ্চলের n^+ পার্শ্বে শূন্যে পৌঁছে। ঝোঁক বিভবে একটি অতিরিক্ত স্তর বৃদ্ধি (অতি বিভব, over voltage) স্বাভাবিকভাবে প্রয়োগ করা হয়; এটি সমগ্র সন্ধায়ী জুড়ে প্রযুক্ত বিভবকে এক ধ্রুবক (constant) পরিমাণে উত্তোলিত করে দেয়। প্রযুক্ত এ অতি বিভবটুকু এমন পর্যাপ্ত হওয়া কাম্য যে আধানবাহক সংপৃক্ত বেগ অর্জন করতে পারে, ফলে তাদের সংগ্রহকাল সর্বনিম্ন হয় এবং পুনর্মিলন ও ফাঁদে আটকা পড়াজনিত ক্ষতিকর প্রভাব নূন্যতম

হয়ে থাকে। জার্মানিয়ামে তরল নাইট্রোজেনের তাপমাত্রায় ইলেকট্রনের সংপৃক্ত বেগ লাভের জন্য বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের ন্যূনতম শক্তি হতে হবে 10^5 ভোল্ট/মিটার কিন্তু হোলের (hole) বেগ পুরাপুরি সংপৃক্ত করার জন্য বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের শক্তি এর তিন থেকে পাঁচগুণ বিশালতর হতে হবে। অতিক্রমণ (break down) বিভব ও পৃষ্ঠলীক সম্পর্কিত ব্যবহারিক সমস্যাদি সর্বোচ্চ বিভব মানকে এমন পর্যায়ে সীমাবদ্ধ করে দেয় যেন কেবল ইলেকট্রনই সংপৃক্ত বেগে পৌঁছতে পারে কিন্তু হোলসমূহ পারে না।



চিত্র ৪.১ : একটি সহজাত জার্মানিয়ামের অবস্থান-অবস্থা। কেন্দ্রীয় P-ধরনের অঞ্চলটি সর্বোচ্চ বিশুদ্ধ জার্মানিয়ামের তৈরি, এবং n^+-p সংগমটি বিমুখী ঝোঁকগ্রস্ত (reverse biased)। বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের অবস্থান-অবস্থাটি ঘটেছে আপেক্ষিক অতি বিস্তারের জন্য ফলে সন্ধায়ীটি সামগ্রিকভাবে বাহকরিক্ত হয়েছে।

৪.৩ উচ্চ বিশুদ্ধ অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র ও আধান ধারকত্ব

Ge(Li) সন্ধায়ীর i-অঞ্চলে সক্রিয় এলাকা নিট স্থান আধান মুক্ত হয় (যদি লিথিয়াম প্রতিবিধান সম্পূর্ণ হয়ে থাকে)। কিন্তু HpGe সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে তা নয়। ফলে

বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের অবস্থান-অবস্থা সম্পূর্ণ আলাদা হয়ে থাকে। আদি উচ্চ বিশুদ্ধ জার্মানিয়ামে উপস্থিত পূর্ণ (filled) গ্রাহক অবস্থান (site) থেকে তড়িৎ আধান উঠে আসে এবং উদ্ভূত নিট ঋণ স্থান (negative space) আধান সমগ্র সক্রিয় এলাকা জুড়ে প্রসারিত হয়ে থাকে (চিত্র ৪.১)। পরবর্তী বিশ্লেষণের জন্য ধরে নেয়া হলো যে $n^+ - p$ জংশনটি আকস্মিক (abrupt), n^+ ও p-অঞ্চলের মধ্যেকার সংযোগ বিভবের (potential) চেয়ে প্রযুক্ত বিমুখী ঝোঁক অনেক বিশালতর এবং n^+ অঞ্চলে ডোপায়নের মাত্রা উচ্চ বিশুদ্ধ p এলাকার অবশেষ অপদ্রব্যের পরিমাণের চেয়ে অনেক গুণে বেশি। অতঃপর পয়সনের সমীকরণ :

$$\Delta^2 \varphi = -\rho/\epsilon \qquad (৪.১)$$

এর সমাধান করে বৈদ্যুতিক বিভব (φ) বের করা যায়। এখানে ρ হচ্ছে আধান বিতরণ এবং ϵ ডাই-ইলেকট্রিক ধ্রুবক। এক্ষেত্রে $\rho = -eN_A$ যেখানে N_A হচ্ছে অপদ্রব্যের ঘনত্ব এবং e ইলেকট্রনের তড়িৎ আধান।

সমতলীয় জ্যামিতির (planer geometry) **সঙ্কায়ী :** এ বইয়ের প্রথম অধ্যায়ে নির্ণীত (derived) ফলাফল থেকে সমতলীয় ডায়োডের জন্য সঙ্কায়ীর বাহকরিক্ত গভীরতা (depletion depth) হচ্ছে 'd' :

$$d = \left(\frac{2\epsilon V}{\rho}\right)^{1/2} \qquad (৪.২)$$

পূর্ণ বাহক রিক্তকরণের জন্য ন্যূনতম প্রযুক্ত বিভব V_d (রিক্তকরণ বিভব) দরকার হয় যাতে রিক্তকৃত জোনের গভীরতা সারা ফলকের (slab) পুরুত্ব T জুড়ে বিস্তার লাভ করে :

$$V_d = \frac{\rho T^2}{2\epsilon} \qquad (৪.৩)$$

এক-মাত্রিক ফলক জ্যামিতিতে পয়সনের সমীকরণ দাঁড়ায় :

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \qquad (৪.৪)$$

পূর্ণ বাহক রিক্তকরণের বিভবের চেয়ে কম প্রযুক্ত বিভবে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র

$$E = -\frac{d\varphi}{dx}$$

পাওয়া যায় সমীকরণ (৪.৪) থেকে ; সীমান্ত শর্ত অনুযায়ী

$$\varphi(d) - \varphi(0) = V$$

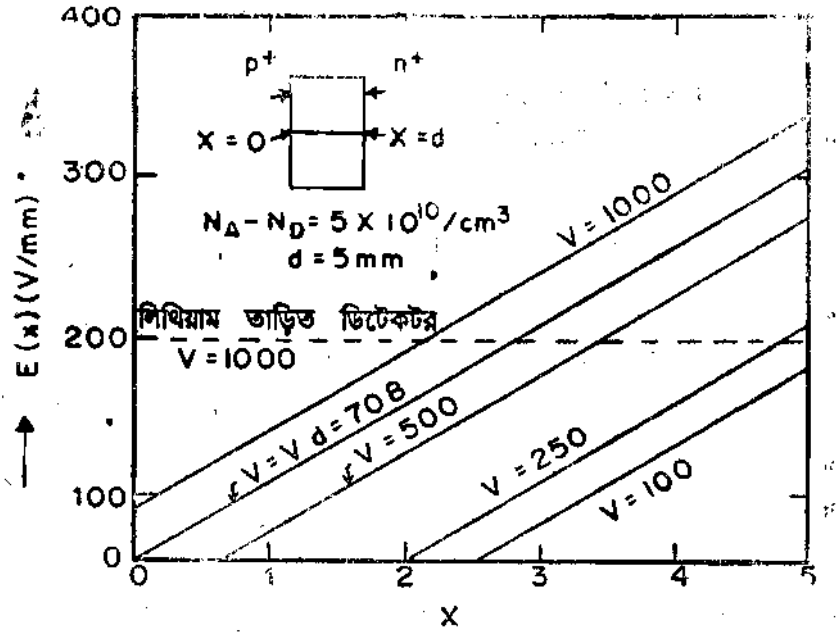
হলে, ফলাফল দাঁড়ায় :

$$-E(x)=\frac{V}{d}+\frac{\rho}{\epsilon}\left(\frac{d}{2}-x\right)$$

বা

$$\left|E(x)\right|=\frac{V}{d}+\frac{eN_A}{\epsilon}\left(x-\frac{d}{2}\right) \qquad (8.৫)$$

যেখানে x হচ্ছে p^+ সংযোগ থেকে দূরত্ব। $V<V_d$ এর জন্য বিস্তৃতি নয় সন্ধায়ীর এমন অঞ্চলের জন্য এ সমাধানের অংশটুকু প্রযোজ্য নয় এবং বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র শূন্য হয়ে যায়। সমীকরণ (৪.৫), $V>V_d$ এর জন্যও কার্যকর বটে কেননা অতি বিভব $(V-V_d)$ এর কাজ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রকে $(V-V_d)/T$ এই ধ্রুবক পরিমাণে বৃদ্ধি করা। সমীকরণ (৪.৫) দ্বারা পূর্বাভাসকৃত কতিপয় বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের অবস্থান-অবস্থা ৪.২ চিত্রে দেখানো হলো।



চিত্র ৪.২ : বিমুখী বোঁক V এর বিভিন্ন মানের জন্য একটি সমতলীয় (planer) HpGe সন্ধায়ীর সমগ্র সক্রিয় এলাকা জুড়ে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের শক্তির পরিবর্তনের ধরন চিত্র। বিভব V_d, যাতে পূর্ণ বাহকবিস্তৃতকরণ ঘটে তা চিহ্নিত করা হয়েছে। একই আয়তনের Ge(Li) সন্ধায়ীর সুষম বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রও তুলনার সুবিধার্থে দেখানো হয়েছে।

পৃষ্ঠবাঁধ বা জংশন সন্ধায়ীর ন্যায় আধান ধারকত্বও প্রযুক্ত বিভবের সাথে পরিবর্তিত হয়ে চলে যে পর্যন্ত না সন্ধায়ীটি পূর্ণভাবে বাহকরিক্ত হয়ে পড়ে। সমতলীয় জ্যামিতির সন্ধায়ীর প্রতি একক ক্ষেত্রফলে আধান ধারকত্ব দাঁড়ায় :

$$C = \left(\frac{\epsilon e}{2V}\right)^{1/2} \qquad (৪.৬)$$

$V > V_d$ হলে সন্ধায়ীর ধারকত্ব ধ্রুবক হয় এবং $V = V_d$ সমীকরণ (৪.৬) এ বসিয়ে তা পাওয়া যায়। প্রযুক্ত বিভবের উপর সন্ধায়ীর ধারকত্বের অনির্ভরশীলতা সন্ধায়ীর ভিতরে পূর্ণ বাহকরিক্ততা সংঘটনেরই নির্দেশক বটে।

সমাক্ষিক জ্যামিতির (coaxial geometry) **সন্ধায়ী ঃ** বিশালায়তন সন্ধান সক্রিয় এলাকা অর্জনের জন্য HpGe সন্ধায়ী সমাক্ষিক জ্যামিতিতে নির্মাণ করা অধিকতর বাঞ্ছনীয়। যে কোনো বেলনাকার কেলাসের (ধরা যাক p-type) বহিঃপৃষ্ঠকে (outer surface) একটি বৈদ্যুতিক সংযোগ হিসেবে কাজ করানোর জন্য সচরাচর লিথিয়ামব্যাপ্ত n^+ স্তরের সংস্থান (provide) করা হয়ে থাকে ; আর দ্বিতীয় বৈদ্যুতিক সংযোগের জন্য সমাক্ষিক কেলাসের কেন্দ্রীয় অন্তর্বস্তু (core) অপসারণ করে অভ্যন্তরীণ পৃষ্ঠে p^+ সংযোগ প্রয়োগ করানো হয়ে থাকে (চিত্র ৪.৩)। যদি r_1 ও r_2 যথাক্রমে অন্তঃস্থ ও বহিঃস্থ ব্যাসার্ধ হয় তাহলে বাহক রিক্তকরণ বিভব হচ্ছে :

$$V_d = \frac{\rho}{2\epsilon}\left[r_1^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - \frac{1}{2}\left(r_2^2 - r_1^2\right)\right] \qquad (৪.৭)$$

পয়সনের সমীকরণের আকারটি হয় :

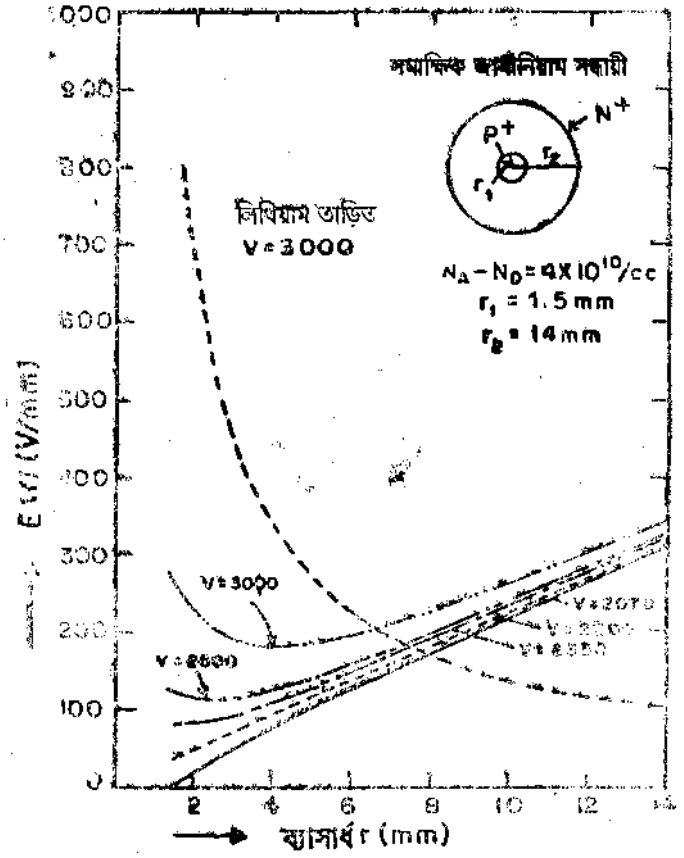
$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\varphi}{dr} = -\frac{\rho}{\epsilon} \qquad (৪.৮)$$

সীমান্ত শর্ত $\varphi(r_2) - \varphi(r_1) = V$ এবং $E(r) = -(d\varphi/dr)$ এর জন্য সমাধান করে উদ্ভূত বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের অবস্থান-অবস্থা দাঁড়ায় :

$$-E(r) = -\frac{\rho}{2\epsilon} r + \frac{V + \frac{\rho}{4\epsilon}(r_2^2 - r_1^2)}{r \ln(r_2/r_1)}$$

বা $$|E(r)| = \frac{eN_A}{2\epsilon} r + \frac{V - \frac{eN_A}{4\epsilon}(r_2^2 - r_1^2)}{r \ln(r_2/r_1)} \qquad (৪.৯)$$

এ শর্তে যে N_A (গ্রাহক গাঢ়ত্ব) সঙ্কায়ীর সমগ্র আয়তন জুড়ে একটি ধ্রুবক মানের হবে। এ ক্ষেত্রের আকারের কতিপয় প্লট বিভিন্ন বিভব মানের (voltage values) জন্য ৪.৩ চিত্রে দেখানো হলো।



চিত্র ৪.৩ : সমাক্ষিক HpGe সঙ্কায়ীর ব্যাসার্ধ বরাবর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের শক্তির পরিবর্তন। পূর্ণ বাহকবিকরণের জন্য বিমুখী জোঁক বিভব ন্যূনতম ২০৭০ ভোল্ট হওয়া প্রয়োজন। সমাক্ষিক Ge(Li) সঙ্কায়ীর ক্ষেত্রে 1/r ক্ষেত্র পরিবর্তনও তুলনার জন্য দেখানো হলো।

অতি সম্প্রতি এমন সমাক্ষিক অতি বিশুদ্ধ জার্মানিয়াম সঙ্কায়ী নির্মাণের প্রচেষ্টা দেয়া হয়েছে যাদের মধ্যেকার অবশেষ অপদ্রব্যের গাঢ়ত্ব সুষম নয়। এমতাবস্থায় ৪.৮ সমীকরণের ρ আর ধ্রুবক থাকে না বলে উদ্ভূত বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের অবস্থান-

অবস্থা পরিবর্তিত হয়ে যায়। এ ধরনের ব্যাসার্ধগত নতির অবস্থান-অবস্থাকে ৪.৩ চিত্রে প্রদর্শিত ক্ষেত্রের আকারের চেয়ে সুষম আকার দেয়া যেতে পারে এবং লীক বিদ্যুৎ প্রবাহও হ্রাস করে ন্যূনতম করা যায়।

৪.৪ স্পন্দের আকার এবং সময়কাল

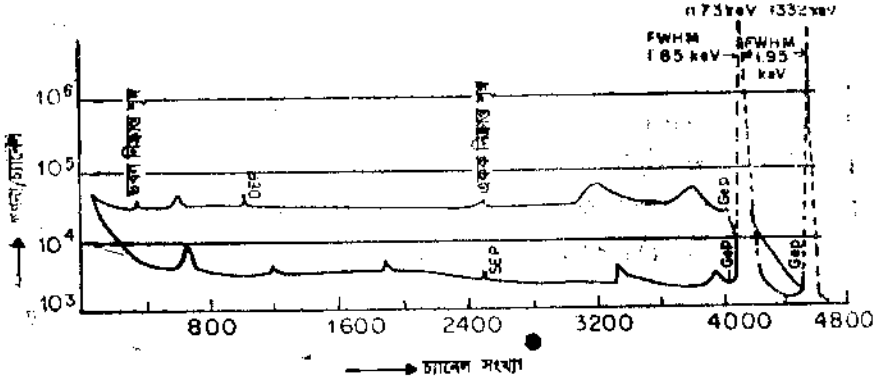
যে কোনো সন্ধায়ীর সময়গত (timing) ও স্পন্দ বৈশিষ্ট্য নিয়ন্ত্রিত হয় সন্ধায়ীর সন্ধান সক্রিয় এলাকায় প্রযুক্ত বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের আকার ও যে দূরত্বে আধান সংগ্রহ হয় তাদের দ্বারা। উচ্চ বিশুদ্ধ জার্মানিয়াম সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে উক্ত উভয় বৈশিষ্ট্যই Ge(Li) সন্ধায়ীর ন্যায় হয়ে থাকে। সমতলীয় অবস্থান-অবস্থায় অবস্থানের সাথে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের পরিবর্তন অভিন্ন আয়তন ও বিভবের Ge(Li) এর স্পন্দের তুলনায় স্পন্দের আকারে অতিরিক্ত উঠানামা ঢুকিয়ে দেয়। এ সকল পরিবর্তন সন্ধায়ীর সময়গত বৈশিষ্ট্যে অবনমন আনয়নে প্রবণ থাকে।

অভিন্ন জ্যামিতি ও প্রযুক্ত বিভবে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের আচরণ Ge(Li) সন্ধায়ীর চেয়ে HpGe-কে সময়গত দিক থেকে আনুকূল্য প্রদর্শন করে। চিত্র ৪.৩ থেকে দেখা যায় যে HpGe সন্ধায়ীর উচ্চ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র এলাকা বহিঃস্থ অঞ্চলের দিকে ঘটে এবং শতকরা ৭৫ ভাগ উচ্চতর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের আওতাধীন হয়ে থাকে যা Ge(Li) এর ক্ষেত্রে ঘটে না। উচ্চতর বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র ইলেকট্রনের সংগ্রহকালে প্রভাব না রাখলেও কিন্তু হোলের সংগ্রহকাল হ্রাসে সহায়তা করে। সন্ধায়ীর সক্রিয় এলাকার বিভিন্ন স্থান থেকে উৎপন্ন স্পন্দের পরিবর্তনশীল আকার এবং পরবর্তীতে বৈদ্যুতিক যন্ত্রপাতির সাড়ার দরুন সময়গত কার্য সম্পাদনা খুবই জটিল হয়ে থাকে।

৪.৫ অতি বিশুদ্ধ জার্মানিয়ামের গামারশ্মি বর্ণালিবীক্ষণে প্রয়োগ

গামারশ্মি সন্ধান দক্ষতা ও সাড়া ফাংশন অভিন্ন আকার ও আয়তনের HpGe ও Ge(Li) সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে অভিন্ন হয়ে থাকে। একটি ৩১ মি. মি. ব্যাস ও ৪.৫ মি. মি. পুরুত্বের HpGe এর দ্বারা রেকর্ডকৃত স্পন্দ উচ্চতা বর্ণালী ৪.৪ চিত্রে প্রদত্ত হলো। শিরোভাগের (top) রেখাচিত্রটি ^{60}Co গামারশ্মিপাতের জন্য স্বাভাবিক বর্ণালী আর তলদেশের রেখাচিত্রটি কম্পটন বিক্ষেপণের অবদান দমনের জন্য জার্মানিয়াম সন্ধায়ীটিকে বিশালায়তন সোডিয়াম আয়োডাইড সিন্টিলেশন সন্ধায়ী দিয়ে বেষ্টন করে অসমাপতন পদ্ধতিতে চালনা করে প্রাপ্ত বর্ণালী। উল্লেখ থাকে যে এ বইয়ের দ্বিতীয় অধ্যায়ে Ge(Li) সন্ধায়ীর কম্পটন কন্টিনিউয়াম (continuum) অবদমনের (suppression) জন্য বিবৃত অপরাপর পদ্ধতিসমূহও HpGe সন্ধায়ীর ক্ষেত্রে সমভাবে প্রযোজ্য।

HPGe সন্ধায়ীতে প্রাপ্ত শক্তি পৃথককরণ Ge(Li) সন্ধায়ীতে প্রাপ্ত শক্তি পৃথককরণের সাথে তুলনীয় বটে। শক্তি পৃথককরণ রাশি সচরাচর 5.9keV (^{55}Fe), 122keV (^{57}Co) ও 662keV (^{137}Cs) এর জন্য বিবৃত হয়ে (specified) থাকে। স্বল্প শক্তির বিকিরণের ক্ষেত্রে শক্তি পৃথককরণ বৈদ্যুতিক নয়েজ দ্বারা শাসিত হয়ে থাকে যা কিনা আবার সন্ধায়ীর আধান ধারকত্বের উপর নির্ভরশীল উচ্চতর শক্তির বিকিরণের জন্য আধান বাহকের পরিসংখ্যান ও ফাঁদে আটকে পড়া শক্তি পৃথককরণের উপর প্রভাব ফেলতে শুরু করে। 122keV শক্তিতে 400-500keV শক্তি পৃথককরণ রাশি পাওয়া খুবই সাধারণ ব্যাপার; তবে 662keV শক্তিতে শক্তি বিস্তার প্রায় 1keV এর উর্ধ্বে হতে দেখা যায়।



চিত্র 8.8 : ^{60}Co গামারশ্মিপাতে একটি HpGe এর স্পেক্ট উচ্চতা বর্ণালী; স্বাভাবিক বর্ণালী (শিরোভাগে), আর কম্পটন কন্টিনিউয়াম অবদমিত বর্ণালী (তলদেশে)। DEP→double escape peak, SEP→single escape peak এবং GEP→germanium escape peak নির্দেশ করছে।

HpGe সন্ধায়ী এক্স-রে বর্ণালিবীক্ষণেও বেশ উপকারী। যদিও সিলিকন সন্ধায়ী সচরাচর এ কাজে ব্যবহৃত হয়ে থাকে তবুও একজোড়া ইলেকট্রন-হোল সৃজনে জার্মানিয়ামে স্বল্পতর শক্তি লাগে বলে সিলিকনের চেয়ে শতকরা ২৮ ভাগ বেশি সংখ্যক আধান বাহক উৎপন্ন হয় জার্মানিয়াম সন্ধায়ীতে; ফলে পরিসংখ্যানিক পৃথককরণ সীমায় তাৎপর্যপূর্ণ উন্নতি সাধিত হয়। তবে অধিক পুরু সহজাত অসক্রিয় স্তর (800nm) ও উচ্চতর শোষণ সহগযোগে 2.3keV শক্তির উর্ধ্বশক্তির এক্স-রের জন্য HpGe এর প্রয়োগ সীমিত হয়ে পড়ে। সিলিকনের অসক্রিয় স্তরের পুরুত্ব 150nm বলে এটি জার্মানিয়ামের চেয়ে অধিকতর উপযোগী।

৪.৬ জার্মানিয়াম ও সিলিকন ছাড়া অন্যান্য অর্ধপরিবাহী পদার্থ

বর্তমানে ব্যবহৃত অর্ধপরিবাহী বিকিরণ সন্ধায়ীর প্রায় সবকটিই সিলিকন অথবা জার্মানিয়াম দিয়ে প্রস্তুত। এদের এ ব্যাপক জনপ্রিয়তার পেছনে রয়েছে তাদের অত্যুৎকৃষ্ট আধান সঞ্চারণ ধর্মাবলী ফলে পুনর্মিলন বা ফাঁদে আটকানো বাবদ

অতিরিক্ত অপচয়ের শিকার না হয়েও বিশালায়তন কেলাস বিকিরণ সন্ধানে ও পরিমাপনে ব্যবহার করা যায়। বিকিরণপাতে সৃষ্ট সমুদয় ইলেকট্রন-হোল জোড়া প্রাথমিক সংকেত উৎপাদনের জন্য কার্যত সংগ্রহ করা যায় এমন ব্যবহারিক আকার আয়তনের সন্ধায়ী নির্মাণ করা সম্ভব হয়েছে সিলিকন ও জার্মানিয়ামের কারণে।

তবে কোনো কোনো দৃষ্টিকোণ থেকে সিলিকন ও জার্মানিয়ামের কোনোটিই আদর্শ সন্ধায়ী পদার্থ নয়। তাপায়নে উৎপাদিত লীক বিদ্যুৎ হ্রাস করার জন্য জার্মানিয়ামকে সদাসর্বদা নিম্ন তাপমাত্রায় চালাতে হয়। নিম্ন নয়েজঘটিত প্রয়োগে অর্থাৎ এক্স-রে বর্ণালিবীক্ষণে সিলিকন সন্ধায়ীকে তদ্রূপ একই কারণে ঠাণ্ডা রাখতে হয়। নীতিগতভাবে প্রশস্ততর ব্যান্ডগ্যাপধারী (উদাহরণস্বরূপ 1.5eV এর অধিকতর শক্তির) এক ভিন্ন অর্ধপরিবাহী পদার্থ বিপুলভাবে উৎপাদিত লীক বিদ্যুৎ হ্রাস করে গৃহতাপমাত্রায় ব্যবহার সম্ভব করবে। অনেক প্রয়োগের ক্ষেত্রেই গৃহ-তাপমাত্রায় চালনার সুবিধাটুকু প্রশস্ততর ব্যান্ডগ্যাপের অসুবিধাও কাটিয়ে উঠতে সাহায্য করে যেমন ইলেকট্রন-হোল জোড়া সৃজনে প্রয়োজনীয় অধিকতর শক্তির কিছুটা উচ্চ তাপমাত্রা সরবরাহ করে থাকে।

গামারশ্মির বর্ণালিবীক্ষণে উচ্চ পারমাণবিক সংখ্যাধারী উপাদানসমূহ সন্ধায়ীর এক বাড়তি সুবিধার বস্তু বটে। যেমন এ ক্ষেত্রে জার্মানিয়াম ($z = 32$) সিলিকনের ($z = 14$) চেয়ে উন্নততর। তাই উচ্চ পারমাণবিক সংখ্যাধারী উপাদান বিশিষ্ট উপযোগী অর্ধপরিবাহী পদার্থ পাওয়ার জন্য প্রবল প্রচেষ্টা চলছে। অদ্যাবধি তিনটি বিশেষ যৌগিক অর্ধপরিবাহী বস্তু গৃহতাপমাত্রায় অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী হিসেবে সম্ভাবনার জন্য বেশ মনোযোগ আকৃষ্ট করেছে, যেমন-ক্যাডমিয়াম টেলুরাইড (CdTe), মারকিউরিক আয়োডাইড (HgI_2) ও গ্যালিয়াম আর্সেনাইড (GaAs)। জার্মানিয়াম ও সিলিকনসহ তাদের কতিপয় ধর্ম ৪.১ সারণিতে প্রদান করা হলো।

সারণি ৪.১ ঃ অর্ধপরিবাহী পদার্থের ধর্মাবলী।

Material	Z	Band gap (eV)	Energy per e-h pair (eV)	Best γ-ray energy resolution (FWHM)
Si(300°K)	14	1.12	3.61	—
Ge(77°K)	32	0.74	2.98	420 eV @ 100 keV 920 eV @ 660 keV 1300 eV @ 1330 keV

Cd Te(300⁰K)	48 — 52	1.47	4.43	{ 3800 eV @	122 keV
				7500 eV @	661 keV
Hg I_2 (300⁰K)	80 — 53	2.13	6.5	{ 850 eV @	6 keV
				3500 eV @	122 keV
GaAs (300⁰K)	31 — 33	1.43	4.2	{ 650 eV @	60 keV
				2600 eV @	122 keV

এ সকল অর্ধপরিবাহী পদার্থ থেকে দরকারি সন্ধায়ী নির্মাণ করতে হলে কিছু কিছু ব্যবহারিক প্রয়োজন মেটাতে হবে। সর্বাগ্রে উপযোগী সন্ধায়ী তৈরির জন্য পর্যাপ্ত আয়তনের বিশুদ্ধ কেলাস জন্মানোর ক্ষমতা থাকা প্রয়োজন। ফাঁদে আটকানোর অপদ্রব্যের ঘনত্ব আধান বাহকের গড় আয়ু নিয়ন্ত্রণ করে আর এ গড় আয়ু উত্তম দক্ষতায় কত দূরত্বে আধান সংগ্রহ করা যাবে তা সীমিত করে। বিশালায়তন বাহকরিক্ত অঞ্চল সৃষ্টি করতে হলে অপদ্রব্যের গাঢ়ত্ব অল্প হতেই হবে।

উচ্চ পারমাণবিক সংখ্যার বিস্তৃতির ব্যান্ড গ্যাপধারী অর্ধপরিবাহী পদার্থের অধিকাংশেরই গৃহতাপে বাহকের সঞ্চারণশীলতা সিলিকন ও জার্মানিয়ামের বাহকের তুলনায় নিম্নতর এবং আয়ুষ্কাল হ্রস্বতর। তদুপরি সন্ধায়ীর আকার আয়তন ক্ষুদ্রতর বলে সেকেন্ডারি ইলেকট্রন ও এক্স-রে নিষ্ক্রান্ত হয়ে যায়।

৪.৬.১ ক্যাডমিয়াম টেলুরাইড অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী: এর শক্তি ব্যান্ড-গ্যাপ (1.47eV) বৃহৎ বলে গৃহতাপে চালনা করা সম্ভব। এর $Z = 48$ ও 52; কটোতড়িৎ শোষণ তাই জার্মানিয়ামের তুলনায় 4—5 গুণ বেশি এবং সিলিকনের চেয়ে 100—200 গুণ বেশি। নিউক্লিয়ার মেডিসিন ও মহাকাশ যান্ত্রিকীকরণ ব্যবস্থা যেখানে আঁটসাঁট গামারশ্মি সন্ধায়ী দরকার করে সেখানে এর সফল প্রয়োগের প্রতিবেদন রয়েছে। CdTe থেকে আপেক্ষিকভাবে উচ্চ বিশুদ্ধ কেলাস জন্মানো যায়; p-ধরনের বস্তুর জন্য ক্লোরিন বাইনডিয়াম দ্বারা ডোপ করা হয়। ক্লোরিন দ্বারা ডোপিত পদার্থের নমুনাগত সঞ্চারণশীলতা আয়ুষ্কাল গুণফল 1 থেকে $2 \times 10^{-3} cm^2/V$ এবং হোলের ক্ষেত্রে 3 থেকে $8 \times 10^{-5} cm/V$। হোলের ক্ষেত্রে এত কম হওয়ার কারণ গ্রাহক অপদ্রব্যের অবশেষের লেভেল প্রায় $10^{15}/cm^3$। বর্তমানে ব্যবহারিক এ ধরনের সন্ধায়ীতে 100 ভোল্ট বিমুখী ঝোঁক প্রয়োগ করা চলে। এর শক্তি পৃথককরণ বৈশিষ্ট্য জার্মানিয়াম ও সিলিকনের চেয়ে কম। CdTe সন্ধায়ীর সমস্যা এর অটল পোলারায়ন সংঘটন যার ফলে সময়ের সাথে গণনা

GC Library

হার হ্রাসের সাথে সাথে আধান সংগ্রহ দক্ষতায়ও হ্রাস ঘটে। এসব সমস্যা সমাধানের প্রয়াস চলছে এবং কিছুটা আশার আলোও দেখা গেছে।

বাণিজ্যিক CdTe সন্ধায়ী 1 মি. মি. থেকে 1 সে. মি. ব্যাসেরও পাওয়া যায়। এরা আপেক্ষিকভাবে এবড়োখেবড়ো। তবে মাঠে ব্যবহারে স্থিত থাকে; 30°C তাপমাত্রায় প্রয়োজনমত চালনায়ও অতিরিক্ত নয়েজ দেয় না।

৪.৬.২ মারকিউরিক আয়োডাইড HgI সন্ধায়ী ঃ উচ্চ পারমাণবিক সংখ্যা ($Z=80$) এবং বিস্তৃত ব্যান্ডগ্যাপ শক্তির বদৌলতে মারকিউরিক আয়োডাইডকে ১৯৭২ সাল থেকে সম্ভাবনাময় সন্ধায়ী পদার্থরূপে ব্যবহারের জন্য ব্যাপক অনুসন্ধান চালানো হয়েছে। ফটোতড়িৎ প্রক্রিয়ার উচ্চ প্রস্থচ্ছেদের (cross-section) জন্য নিম্ন-শক্তির গামা বিকিরণ মিথস্ক্রিয়ার সম্ভাব্যতা জার্মানিয়ামের তুলনায় 100 গুণ বেশি। যেহেতু 100keV শক্তির ফোটনের শতকরা 85 ভাগই 1 মি. মি. পুরুত্বের মধ্যে শোষিত হয়ে পড়ে তাই এটি নিম্নশক্তির গামা ও এক্স-রের জন্য আঁটসাঁট সন্ধায়ীরূপে প্রতিশ্রুতি বহন করে। বিস্তৃত ব্যান্ডগ্যাপ শক্তি (2—10eV) তাপায়নজনিত অতিরিক্ত নয়েজ ব্যতীত গৃহতাপমাত্রায় চালনায় সহায়তা করে। এর সঞ্চারণশীলতা-আয়ুষ্কাল গুণফল নিম্ন (হোলের জন্য 2×10^{-6} cm^2/V আর ইলেকট্রনের জন্য $\sim10^{-1}$ cm^2/V)। কাজেই আধান সংগ্রহ পুরাপুরিভাবে ঘটা কঠিন। পোলারায়ন সমস্যার সুষ্ঠু সমাধানসহ বৃহত্তর আয়তনের কেলাস গঠন করে উত্তম আধান সংগ্রহ বৈশিষ্ট্য অর্জিত হলে এ সন্ধায়ীটির আরো বহুবিধ প্রয়োগ সম্ভব হবে।

৪.৬.৩ গ্যালিয়াম আর্সেনাইড (GaAs) সন্ধায়ী ঃ পর্যাপ্ত প্রশস্ত ব্যান্ডগ্যাপ-ধারী অপর একটি অর্ধপরিবাহী পদার্থ গ্যালিয়াম আর্সেনাইড গৃহতাপমাত্রায় চালানো যায়। আলফা, বিটা ও গামা বিকিরণের সরল বর্ণালিবীক্ষণে এর দ্বারা তৈরি পৃষ্ঠ-বাঁধ সন্ধায়ীর প্রচুর প্রতিবেদন রয়েছে। 5.4 MeV শক্তির আলফার জন্য শক্তি পৃথক-করণ শতকরা ০.৩৯ ভাগ। কিন্তু 122keV গামা বিকিরণের জন্য অনেক কম শক্তি পৃথককরণ পাওয়া গেছে। এর কারণ অস্বাভাবিক লীক বিদ্যুৎ এবং সন্ধায়ী থেকে আগত থেমে থেমে আচমকা নয়েজ (সন্ধায়ীকে অতিক্রমণ বিভবে চালনার দরুন সৃষ্ট নয়েজ)।

৪.৬.৪ বিবিধ অর্ধপরিবাহী পদার্থ (Miscellaneous semiconductor materials) **:** অন্যান্য সম্ভাবনাময়ী অর্ধপরিবাহী পদার্থের মধ্যে রয়েছে Bi_2S_3, GaSe, AlSb, PbI_2, ইত্যাদি। Bi_2S_3 এর ব্যান্ড গ্যাপ শক্তি 1.3eV এবং GaSe এর 2.03eV। এদের কোনোটিই বাণিজ্যিক উৎপাদনে যায় নি তবে অনুসন্ধান চলছে। সন্ধায়ী হিসেবে হীরার সীমিত ব্যবহার বিশেষ বিশেষ ক্ষেত্রে চালু হয়েছে। এর

ব্যান্ডগ্যাপ অনেক বেশি বিস্তৃত ($\sim$ 5.6eV) এবং সাধারণ পরিবাহী সন্ধায়ীরূপে ব্যবহার করা যায়। এদেরকে অতি উচ্চ তাপমাত্রায়ও ব্যবহার করা যায়; 300°C তাপমাত্রায় ব্যবহারের প্রতিবেদনও রয়েছে।

৪.৭ প্রপাত সন্ধায়ী (Avalanche detector)

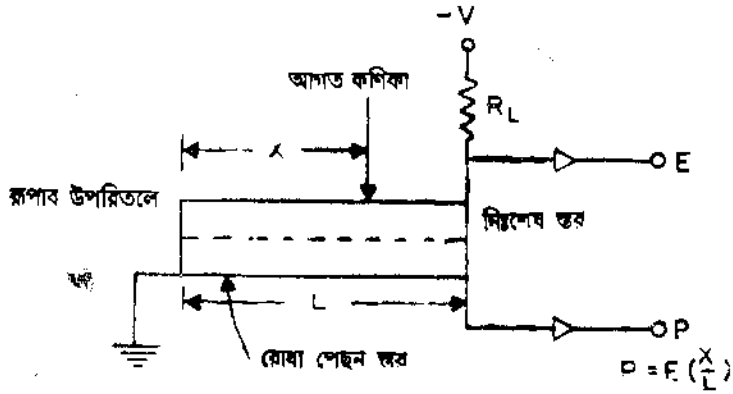
স্বাভাবিক কঠিন অবস্থার সন্ধায়ী প্রচলিত গ্যাস ভরতি আয়নায়ন প্রকোষ্ঠের সদৃশ বটে। উভয় ক্ষেত্রেই উদ্দেশ্য হচ্ছে আপতিত বিকিরণ সন্ধায়ীতে যে আধান বাহক সৃষ্টি করে সাধারণভাবে তা সংগ্রহ করা। কিছু কিছু শর্তাধীনে কঠিন অবস্থার সন্ধায়ীতেও আধান গুণন ঘটানো সম্ভব। উদ্ভূত কৌশলটি (device) তখন সমানুপাতিক গ্যাস কাউন্টারের মত হয় এবং একেই প্রপাত সন্ধায়ী (avalanche detector) বলা হয়। এগুলি নিম্ন শক্তির বিকিরণ সন্ধানে বেশ উপযোগী বলে জনপ্রিয় বটে।

অর্ধপরিবাহীটিতে আধান বৃদ্ধির (gain) জন্য বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রকে এমন পর্যাপ্ত পরিমাণে উচ্চ করা হয় যেন অভিপ্রয়াণরত ইলেকট্রনসমূহ সংগ্রহ প্রক্রিয়াকালে সেকেন্ডারি আয়নায়ন ঘটায়। এ ব্যবস্থায় কয়েকশত গুণ আধান বৃদ্ধি ঘটানো যেতে পারে। সংকেত ও নয়েজের অনুপাত এবং সাড়ার দ্রুতিতে প্রপাত সন্ধায়ী বেশ কিছু আকর্ষণীয় ধর্মাবলী প্রদান করে। যেহেতু বৃদ্ধিটি সরাসরি সন্ধায়ীর নিজের মধ্যেই সংস্থান করা হয় তাই সমুদয় নয়েজ উৎস কার্যকর হওয়ার আগেই সংকেত ও নয়েজের মধ্যে বিদ্যমান অনুপাতটি বেশ উল্লেখযোগ্য পরিমাণে উন্নীত হয়ে থাকে বাহ্যিকভাবে (externally) পূর্বপরিবর্ধকের দ্বারা সমপরিমাণ বৃদ্ধি ঘটানোর তুলনায়। উচ্চ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের প্রভাবে বাহকের গুণক অঞ্চল অতিক্রমণকাল অত্যন্ত কম হয় এবং স্পন্দের উত্থানকাল 3×10^{-9} সেকেন্ড পর্যায়ে থাকে। এ সকল গুণের সমাবেশের দরুন নিম্ন শক্তির বিকিরণপাতেও সংকেত ও পটভূমির মধ্যে (signaltobackground) উত্তম অনুপাত পাওয়া যায়। উর্ধ্ব তাপমাত্রায়ও এতে তেমন ক্ষতিকর প্রভাব পড়ে না। উদাহরণস্বরূপ বলা যায় যে 1.5 keV এক্স-রেকে শতকরা 30—40 ভাগ সহজাত দক্ষতায় 85—100°C তাপমাত্রায় সন্ধান ও পরিমাপন করা গেছে পটভূমিজনিত গণনা অত্যন্ত নিম্ন পর্যায়ে রেখেই। নয়েজের এ হ্রাস অধিকাংশই অর্জিত হয় সন্ধায়ী থেকে উৎপাদ স্পন্দের অতি দ্রুত উঠার দরুন বৈদ্যুতিক আকারদানের (shaping) সময়কে অত্যন্ত হ্রস্ব করা যায় বলে। সন্ধায়ীর অভ্যন্তরীণ বৃদ্ধির (gain) কারণে 0.6 keV এক্স-রেও প্রভেদ (discrimination) বিন্দুর উপরে স্পন্দ উৎপাদন করতে পারে।

৪.৮ মিথস্ক্রিয়াস্থল সুবেদী অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী (Interaction Position sensitive semiconductor detectors)

আপতিত বিকিরণের শক্তিসহ মিথস্ক্রিয়াস্থলের ধারণা থাকা অনেক প্রয়োগের ক্ষেত্রেই দরকার হয়। মিথস্ক্রিয়াস্থল জানার উপযোগী প্রধান দু'ধরনের সন্ধায়ী হচ্ছে গ্যাস

ভরতি সমানুপাতিক সন্ধায়ী ও সিলিকন জার্মানিরামের তৈরি অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী। আঁটসাঁট ও নিম্ন ঝোঁক বিভবের (bias voltage) জন্য অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীসমূহকে অধিকতর পছন্দ করা হয় এ কাজের জন্য ; তাছাড়া থামানোর ক্ষমতা অধিকতর থাকার জন্যও দীর্ঘ যাত্রাপরিসরবিশিষ্ট বিকিরণের সন্ধান ও পরিমাপনে এগুলি অধিকতর উপযোগী। সরলতম গঠনে স্থান-সুবেদী অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ী একমাত্রিক সিলিকন বা জার্মানিয়াম ফালি দ্বারা তৈরি করা হয়ে থাকে (চিত্র 8.৫)।



চিত্র ৪.৫ : স্থান সুবেদী অর্ধপরিবাহী সন্ধায়ীর মৌলিক ব্যবহারিক অবস্থান-অবস্থা। X হচ্ছে মিথস্ক্রিয়াস্থলের দূরত্ব এবং L ফালির বেধ।

গাণিতিক সমস্যা

১। কপার ও দস্তার K-বৈশিষ্ট্যমূলক এক্স-রের আলাদা আলাদা পৃথককরণের জন্য Si(Li) সন্ধায়ীর শক্তি পৃথককরণ (resolution) কত হওয়া দরকার ?

২। NaI(Tl) well-type সন্ধায়ীর পরম স্পন্দশূন্য দক্ষতা শতকরা 80 ভাগ ; একটি ^{57}Co উৎসকে 10 মিনিটকাল গণনা করে 122 keV স্পন্দশূন্যের অধীনে 1,06,850টি গণনা (count) পাওয়া গেল। বিকিরণ 300 $(মি.মি.)^2$ Si(Li) সন্ধায়ীর পৃষ্ঠ থেকে 10 সে.মি. দূরে রেখে 30 মিনিটকাল ধরে গণনা করে 7.1 keV এক্স-রে স্পন্দশূন্যের অধীনে 20 টি গণনা পাওয়া গেল ; এ শক্তিতে Si(Li) সন্ধায়ীর দক্ষতা কত ?

৩। একটি 4 মি.মি. পুরু Si(Li) সন্ধায়ীর চালনা বিভব 2,000 V. এমতাবস্থায় আধান সংগ্রহের সর্বোচ্চ সময় কত হবে ?

গ্রন্থপঞ্জি

1. K. Siegbahn Ed., *Alpha, Beta, and Gamma-ray spectroscopy*. North Holland Pub. Co., Amsterdam, (1968).

2. F. Adam and R. Dams, *Applied Gamma-ray Spectrum Catalogue*, 2nd Edition, Pergamon Press, Oxford, (1970).
3. H. Cember, *Introduction to Health Physics* 2nd. Ed., Pergamon Press, New York, Oxford, (1983).
4. G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley and Sons, New York, (1983).
5. আবদুল জলিল, বিকিরণ নিরোধ ও পারমাণবিক নিরাপত্তা, বাংলা একাডেমী (১৯৯৩)।
6. আবদুল জলিল, তেজস্ক্রিয়তা ও তেজস্ক্রিয় বিকিরণ, বাংলা একাডেমী, (১৯৯৩)।
7. আবদুল জলিল, এক্স-রে ও বাংলাদেশে এক্স-রে সম্পাত, বাংলা একাডেমী, (১৯৯৫)।
8. আবদুল জলিল, স্বাস্থ্য পদার্থ বিজ্ঞান পরিচিতি, বাংলা একাডেমী, (১৯৯৫)।

পঞ্চম অধ্যায়

বিবিধ বিকিরণ সন্ধায়ী ও এদের প্রয়োগ কৌশল

(Miscellaneous Detectors and Their Application Techniques)

৫.১ ভূমিকা

এ যাবৎ আলোচিত প্রধান প্রধান সন্ধায়ীগুলো ছাড়াও আরো কতিপয় আধুনিক সন্ধায়ী আছে যেগুলোর বহুল প্রয়োগ প্রচলিত রয়েছে। তন্মধ্যে প্রধান প্রধানগুলি হচ্ছে : রেডিও ফটো লুমিনেসসেন্স (Radio pho toluminescence, RPL) সন্ধায়ী, তাপীয় পরপ্রভ (Thermo luminescent সংক্ষেপে (TL)) সন্ধায়ী, ফটোগ্রাফিক ইমালশন (Photographic Emulsion) সন্ধায়ী, সিরেনকভ সন্ধায়ী (Cerenkov detector), কঠিন অবস্থার ট্র্যাক (Solid state track) সন্ধায়ী এবং নিউট্রন বর্ষণে ধাতবপাতকে তেজস্ক্রিয় সক্রিয়করণের মাধ্যমে নিউট্রন সন্ধান (Neutron detection by activation foils)। এদের বিষয়ে সংক্ষেপে আলোচনা করা হলো।

প্রথমে পরপ্রভ সন্ধায়ীর বিবরণ দেয়া হলো।

৫.২ পরপ্রভ সন্ধায়ী (Luminescent detector)

পরপ্রভা সম্বন্ধে প্রথম খণ্ডের অষ্টম অধ্যায়ের ৮.২.১ অনুচ্ছেদে আলোকপাত করা হয়েছে। তাই এখানে বিশদ আলোচনার প্রয়োজন নেই। মনে রাখতে হবে যে আপতিত শক্তি শোষণের পর বস্তুর দৃশ্যমান আলো নির্গমন প্রক্রিয়াকে পরপ্রভ বলা হয়। কোনো কোনো পরপ্রভ বস্তুতে আবেশিত উত্তেজনা শক্তি দীর্ঘকালের (ঘণ্টা থেকে বেশ কয়েক বছর) জন্য আবদ্ধ হয়ে পড়ে থাকে এবং তাপ সরবরাহ করে অথবা অবলোহিত/দৃশ্যমান আলোকপাত দ্বারা উত্তেজননের মাধ্যমে অবমুক্ত করা যায়। প্রথমোক্ত ক্ষেত্রে প্রক্রিয়াটি তাপীয় পরপ্রভা এবং শেষোক্ত ক্ষেত্রে বিকিরণ আবেশিত পরপ্রভা নামে পরিচিত।

আয়নায়নকারী বিকিরণপাতের দরুন অসংখ্য পরপ্রভ পদার্থ আলো নির্গত করে থাকে আর আলো সন্ধানের বৈদ্যুতিক প্রণালী (যেমন, photomultiplier tube যা সম্পর্কে ইতোমধ্যেই প্রথম খণ্ডের নবম অধ্যায়ে সবিস্তারে আলোচনা করা হয়েছে) উন্নয়নের ফলে যে কোনো তড়িৎ আধান বা শক্তি কণিকা (energy quanta) শোষণজনিত নির্গত আলো সন্ধান ও পরিমাপন যারপর নাই সহজ হয়ে উঠেছে। শক্তিধর বিকিরণ থেকে শক্তি শোষণের দরুন বস্তুর পরমাণু বা অণুসমূহ

শক্তিপ্রাপ্ত বা আয়নায়িত হয়ে থাকে। ফলে এক শক্তি স্তর থেকে অন্য শক্তি স্তরে (energy level) ইলেকট্রনীয় উত্তরণ (transition) ঘটে এবং আলোক নির্গত হয়। এ আলো নির্গমন শনাক্তকরণ দ্বারা বিকিরণপাত সন্ধান তথা বিকিরণপাতের বৈশিষ্ট্য ও পরিমাণ জানা যেতে পারে। এ পর্যায়ে কতিপয় গুরুত্বপূর্ণ কঠিন অবস্থার (solid state) পরপ্রভ সন্ধায়ীর উপর সংক্ষিপ্ত আলোচনা করা হলো।

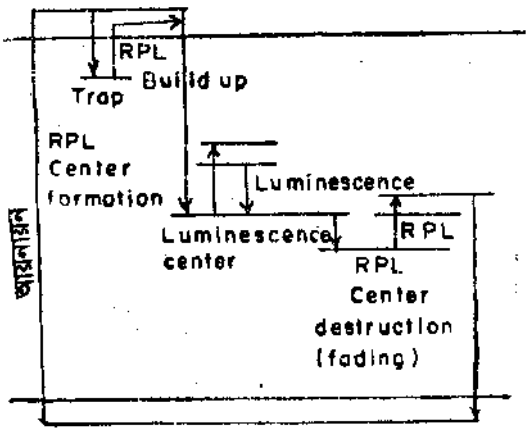
৫.২.১ **বিকিরণ পরপ্রভ** (Radio photo luminescent) **সন্ধায়ী** : এমনও প্রতিবেদন রয়েছে যে সেই সুদূর ১৯১২ সালে বিকিরণপাতগ্রস্ত বেশ কতিপয় অজৈব যৌগকে অতিবেগুনি আলো দ্বারা উত্তেজননের ফলে এগুলির পরপ্রভায় উল্লেখযোগ্য পরিবর্তন লক্ষ্য করা গেছে। বিকিরণ সন্ধান ও পরিমাপনে প্রথম ব্যবহারিক সন্ধায়ী হচ্ছে ফসফেট গ্লাস ; এটি বাণিজ্যিক পর্যায়ে নির্মিত হয়। প্রায় ৪ মিলিয়ন ফসফেট গ্লাস উৎপাদিত হয়েছে এ যাবৎ। অতীব ছোট আকারের ফসফেট গ্লাস সূচের সাহায্যে অভ্যন্তরীণ বিকিরণপাত (internal dosimetry) পরিমাপন করা সম্ভব হয়েছে। এ ধরনের সন্ধায়ী আজ এতটাই উন্নত পর্যায়ে পৌঁছেছে যে 10mR এর কাছাকাছি নিম্ন বিকিরণপাতও নির্ভরযোগ্যতা ও আস্থাসহকারে নিরূপণ করা যায় সহজেই ; তদুপরি এতে বিকিরণপাত স্থায়ী প্রভাব রাখে বিধায় বার বার পরখ করা চলে এবং সংকলিত (integrated) বিকিরণপাত গ্রহণকালে মধ্যবর্তী সময়েও বিকিরণপাত পরিমাপন করা চলে। বিষয়টির উপর এ যাবৎ রাশি রাশি গবেষণা কার্য ও পর্যালোচনা হয়েছে এবং এর উপর রচিত গবেষণা প্রবন্ধ ও পুস্তকের সংখ্যা ৫০০ এর অধিক।

কঠিন অন্তরক বস্তু যেমন, ক্ষারকীয় হ্যালাইডের (alkali halide যথা : NaCl, LiF, etc.) গঠন প্রণালী এমন যে এগুলোর কেলাসে (crystal) ক্ষার ও হ্যালাইড আয়ন (ion) পরস্পর ভিতরে প্রবেশের মাধ্যমে ঘনক ল্যাটিস (cubic lattice) আকারে একের পেছনে অপরে সুসজ্জিতভাবে বিরাজ করে। কেবল আদর্শ কেলাসের গঠনেই ঠিক ঠিক এমনটি ঘটার সম্ভাবনা আছে বাস্তবে তা সম্ভব নয় ; আসল কেলাস গঠনে বহুবিধ গাঠনিক ত্রুটি ও অসম্পূর্ণতা যেমন, স্থানে স্থানে এলোমেলোভাবে আয়নের অনুপস্থিতি, স্বাভাবিক স্থানচ্যুতি (displacement), আয়ন শূন্যতা (vacancy) প্রভৃতি নানাবিধ বৈকল্য পরিলক্ষিত হয়।

বিশুদ্ধ কেলাসে ধন-আয়নের সংখ্যা ঋণ-আয়নের সমান বিধায় তড়িৎ নিরপেক্ষতা বজায় থাকে। কেলাসের যে কোনো স্থলের আয়ন শূন্যতা তদস্থলে বিপরীতধর্মী আয়নের উপস্থিতির ন্যায় প্রভাব রাখে এর পরিপার্শ্বস্থ এলাকা জুড়ে কারণ আয়নশূন্য স্থলে ও আশপাশে তড়িৎ-নিরপেক্ষতা আর বজায় থাকে না। এমতাবস্থায় আয়নায়নকারী বিকিরণপাত কেলাসে গুরুত্বপূর্ণ প্রভাব ফেলে ; যেমন,

আয়নায়নের দরুন ছাড়া পাওয়া কোনো ইলেকট্রন ইতস্তত ঘোরাফেরার সময় নিকটস্থ ধন-আয়ন শূন্যস্থলে বাধা পড়তে পারে। একটি ইলেকট্রন আধানের ঘাটতি (যাকে ধন-আয়ন (positive ion) বলা হয়ে থাকে) কেলাসের এক স্থান থেকে অন্য স্থানে যেতে পারে এবং নিকটস্থ ঋণ-আয়ন দ্বারা কুলম্ব সূত্র অনুযায়ী আকর্ষিত বা আবদ্ধ থাকতে পারে। এখন ধন-আয়ন শূন্যস্থলে (vacancy) আবদ্ধ ইলেকট্রন সিস্টেমটি (system) বহুলাংশে একটি হাইড্রোজেন পরমাণু সদৃশ ; হাইড্রোজেন পরমাণুর ইলেকট্রনটির মতই এর রয়েছে অনুমোদিত বিচ্ছিন্ন শক্তিস্তর (allowed discrete energy levels) যেখানে এটি পরিবৃত্তি (transition) করতে পারে শক্তি শোষণ বা নিঃসরণের মাধ্যমে। শক্তি শোষণ ইলেকট্রনকে শক্তি স্তরের ভূমি অবস্থা (ground state) থেকে উচ্চতর শক্তি স্তরে তুলে উত্তেজিত করে দেয় অথবা শূন্যস্থলে আবদ্ধতা থেকে অবমুক্ত করে ফেলে। শোষিত আলো কেলাসকে বর্ণময় (coloured) করে তোলে ; যে সকল গাঠনিক ত্রুটি, বিচ্যুতি ও খুঁতের দরুন এ সকল শোষণ ঘটে তাদেরকে বর্ণ-কেন্দ্র (colour centre) বলা হয়।

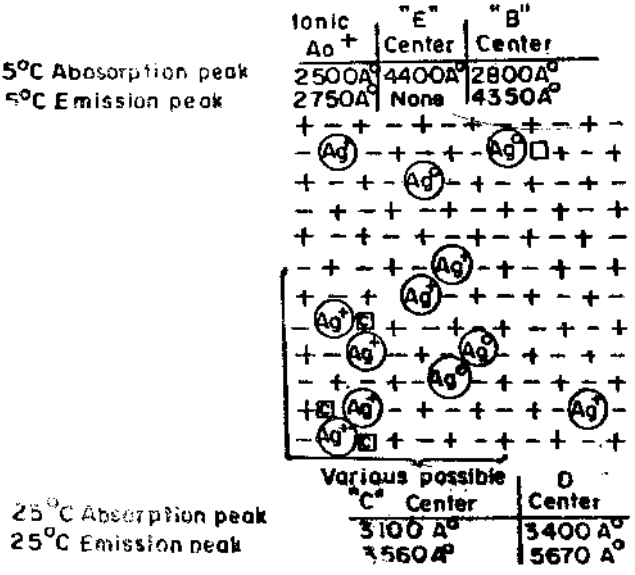
উত্তেজিত বর্ণ-কেন্দ্র বিকিরণহীন শক্তি অপচয় বা আলো নিঃসরণ (পরপ্রভা) অথবা এ উভয়বিধ প্রক্রিয়ার সম্মিলনে উত্তেজনা প্রশমন ঘটায়ে থাকে। এতদ্ব্যতীত উচ্চ শক্তির বিকিরণপাত স্থায়ী বর্ণ-কেন্দ্র উৎপন্ন করে থাকে যা পরবর্তীতে কেবল-সন্নিকৃষ্ট (approximate) আলোকীয় পর্যাবৃত্তি হারের (optical frequency) বিকিরণ দ্বারা উত্তেজননের পরপ্রভা সৃষ্টি করে থাকে। এ ঘটন প্রক্রিয়াটি বিকিরণ পরপ্রভ (RPL) বলে পরিচিত। ৫.১ চিত্রে তা দেখানো হলো। চিত্রে দেখা



চিত্র ৫.১ : রূপা দিয়ে সক্রিয়কৃত গ্লাস ডজিমিটারের শক্তি ব্যাণ্ডের বর্ণনা।

যার পর্যাপ্ত শক্তির আয়নায়নকারী বিকিরণ ইলেকট্রনসমূহকে পরিবাহী ব্যান্ডে (conduction band) তুলে দিলে তাদের কতিপয় সরাসরি ধন-তড়িতাহিত পরমাণুর দ্বারা আবদ্ধ হয়ে নতুন বর্ণ-কেন্দ্র গড়ে তোলে। অপরদিকে বাকি ইলেকট্রন-গুলো প্রথমে এমন বর্ণকেন্দ্রে বাঁধা পড়ে যা RPL এ সহায়তা করে না এবং পর-বর্তীতে তাপায়নের মাধ্যমে কার্যকর বর্ণ-কেন্দ্রে স্থানান্তরিত হয়ে থাকে।

রূপা$^+$ডোপিত (Ag$^+$doped) ক্ষারক-হ্যালাইডে (alkali-halide) বিকিরণ আবিষ্ট প্রভাবসমূহ (effects) ইতোমধ্যেই ব্যাপকভাবে খতিয়ে দেখা হয়েছে। গ্লাস সন্ধায়ীদের সকলের ক্ষেত্রেই এ সমুদয় পর্যবেক্ষণে প্রাপ্ত তথ্যাদি সমভাবে প্রযোজ্য। ৫.২ চিত্রে উচ্চ শক্তির বিকিরণপাতে আবিষ্ট বর্ণ-কেন্দ্রের নমুনা প্রদর্শিত হলো। চিত্রের শীর্ষে শোষণ ও পরপ্রভা সংঘটনের স্পন্দ চূড়া তরঙ্গদৈর্ঘ্য (peak wave length) বিবৃত হয়েছে। বিকিরণপাতের প্রাক্কালে Ag$^+$ডোপিত ক্ষারক-হ্যালাইড অতিবেগুনি আলোয় স্বচ্ছ থাকে কিন্তু বিকিরণপাতের ফলে শোষণ ব্যান্ড (absorption band) সৃষ্টি হয় যা অতিবেগুনি আলোর পরশে দৃশ্যমান পরপ্রভা উৎপন্ন করে থাকে। শুরুতে ধারণা করা হয়েছিল যে ধন নিরপেক্ষ Ag^0-পরমাণুর

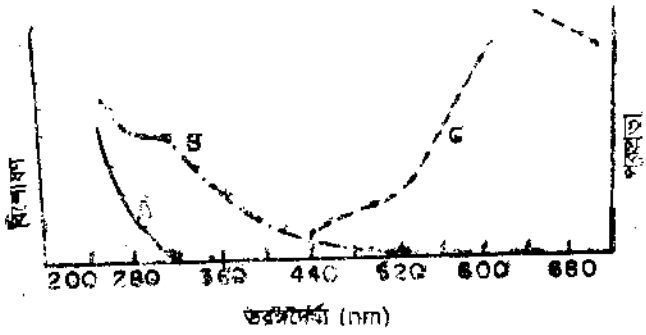


চিত্র ৫.২ : Ag+ ডোপিত পটাশিয়াম ক্লোরাইডে বিকিরণপাতে উৎপন্ন বর্ণ-কেন্দ্রের নমুনাদি (after Schulman, 1967)।

দরুন RPL ঘটে (Ag^0, centre E) অথবা Ag^+ — modified এর দরুন (centre B)। আরো গবেষণা চালিয়ে দেখা গেল অধিকতর জটিল বর্ণ-কেন্দ্র যেমন, (Ag^+ ion + hole + positive ion vacancy) হচ্ছে অধিকতর সম্ভাব্য কারণ। বিকিরণপাতের অব্যবহিত পরে গ্লাস সন্ধায়ীতে কিছু অদ্ভুত ব্যাপার ঘটতে দেখা যায়; তাৎক্ষণিকভাবে RPL ঘনত্ব বেড়ে যায় (build up) যা পরে fading এর দরুন উপরিপাতিত (superimposed) হয়ে থাকে। তাছাড়া তাপমাত্রা, রূপার ঘনত্ব, গ্লাসের গাঠনিক উপাদান বিকিরণের রৈখিক শক্তি হস্তান্তরণের (LET Linear energy tranfer) উপরও RPL নির্ভরশীল বটে।

সংবেদনশীল হওয়ার জন্য সকল RPL সন্ধায়ীতে রূপা সক্রিয়কৃত অ্যালুমিনু-ফসফেট গ্লাস ও অন্যান্য উপাদান $Ba^{2+} + K^+$ এর মেটাফসফেট বা $Mg^{+2} + Li^+$ এর মেটাফসফেটের সন্নিবেশ দ্বারা প্রস্তুত করা হয়; TiO_2 ব্যবহারেরও নজীর রয়েছে।

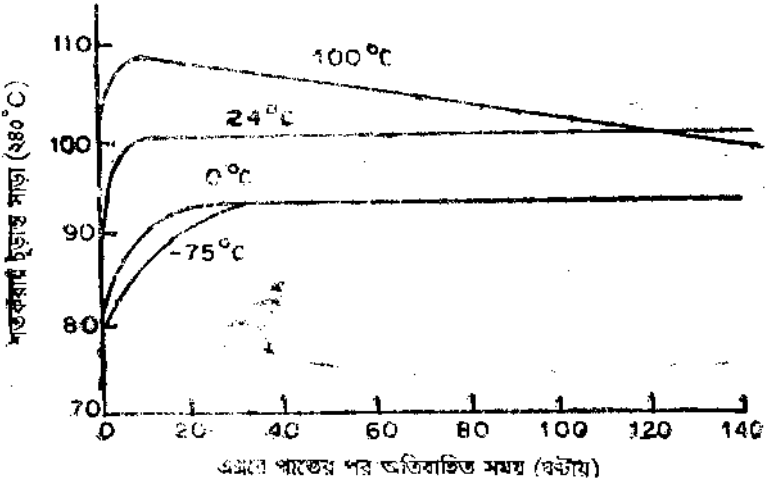
আমনায়নকারী বিকিরণ রূপা-সক্রিয়কৃত ফসফেট গ্লাসে দুটি প্রভাব ফেলে (চিত্র ৫.৩) : (১) অতিবেগুনি ও দৃশ্যমান আলোর এক বিস্তৃত তরঙ্গদৈর্ঘ্য অঞ্চল জুড়ে আলোক ঘনত্বের (optical density) বৃদ্ধি, এবং (২) অতিবেগুনি আলোর উত্তেজননে স্থিতিশীল প্রতিপ্রভ কেন্দ্র সৃজন। এ পরপ্রভ তীব্রতা (intensity) মেপে



চিত্র ৫.৩ : রূপা সক্রিয়কৃত ফসফেট গ্লাসের আলোকীয় বর্ণালীরেখা A, গামা বিকিরণপাতের আগে ; B, গামাপাতের পরে এবং C, 365 nm উত্তেজননে নিঃসৃত আলোক বর্ণালী নির্দেশ করছে।

বিকিরণপাতের পরিমাপ করা চলে। বিকিরণপাত বৃদ্ধির সাথে অতিবেগুনি বিকিরণের সন্নিকটস্থ শোষণ বেড়ে চলে শুরুতে রৈখিক ধারাক্রমে; অতঃপর সংপৃক্ত হয়ে হ্রাস পেয়ে চলে।

উচ্চতর তাপমাত্রায় সাড়া (response) মন্দীভূত হয় এবং RPL কেন্দ্রসমূহ তাপীয়ধ্বংসের শিকার হয়ে পড়ে (চিত্র ৫.৪)। 300°C তাপমাত্রায় আধ ঘণ্টা থেকে এক ঘণ্টাকাল ধরে তাপ প্রয়োগে বর্ণ-কেন্দ্রগুলো সম্পূর্ণ বিনাশ পায় এবং প্রারম্ভিক নিষ্প্রভ অবস্থায় ফিরে যায়।



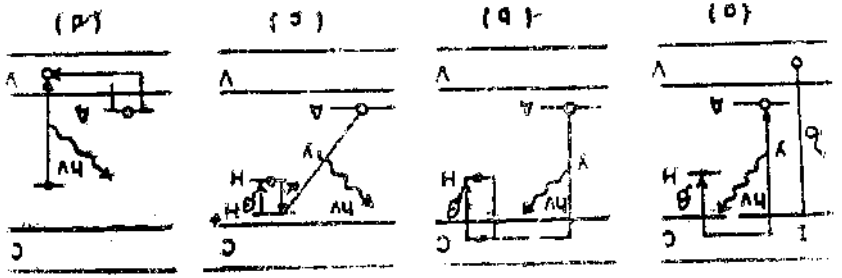
চিত্র ৫.৪ : বিভিন্ন তাপমাত্রায় রূপা সক্রিয়কৃত ফসফেট গ্লাসের বর্ণকেন্দ্রের বৃদ্ধি ও বিবর্ণ (fade) হওয়া।

শুরুতেই ২ সে.মি^{2} × ৬ মি. মি পুরু চতুষ্কোণাকার লম্বাটে গ্লাস সন্ধায়ী প্লাস্টিক লকেটে পুরে দুর্ঘটনাজনিত ব্যক্তিক বিকিরণপাত পরিমাপনে সাময়িক ক্ষেত্রে ব্যবহার করা হতো। তদ্বারা তখন সর্বনিম্ন 10R পর্যন্ত বিকিরণপাত মাপা সম্ভব ছিল। পরবর্তীতে রাসায়নিক বিশুদ্ধিকরণ, নিম্ন পারমাণবিক সংখ্যার (z) গাঠনিক উপাদান ব্যবহার ও উন্নতমানের ফ্লোরিমিটার (flourimeter) উদ্ভাবন এ সন্ধায়ীর সংবেদনশীলতা বহুগুণে বাড়িয়ে তোলে এবং 50 mR বিকিরণপাতের নিচেও পরিমাপন সম্ভব করেছে। তাই এটি একটি আকর্ষণীয় বিকিরণ মনিটর হয়ে উঠেছে।

৫.২.২ তাপীয় পরপ্রভ সন্ধায়ী (Thermo luminescent (TL) detector) : আয়নায়নকারী বিকিরণের অন্যতম প্রথম সন্ধায়ীটি ছিল তাপীয় পরপ্রভ বস্তু, $CaSO_4$: Mn^{34} (ম্যাঙ্গানিজ-34 দ্বারা সক্রিয়কৃত ক্যালসিয়াম-সালফেট)। ইতোমধ্যেই উল্লেখ করা হয়েছে যে এমন কিছু কঠিন পদার্থ রয়েছে যেগুলি বিকিরণপাতগ্রস্ত হলে ইলেকট্রনসমূহকে সুগভীর ফাঁদে (trap) আটকে রাখে এবং তাপের আকারে

সামান্য কিছু শক্তি সরবরাহ পেলে পরপ্রভা নিঃসৃত করে। এ ঘটন প্রক্রিয়াকে তাই তাপীয়-পরপ্রভা বলা হয়। নিঃসৃত পরপ্রভার পরিমাণ বিকিরণপাতের পরিমাণের সমানুপাতিক বিধায় এটি একটি চমৎকার বিকিরণ সন্ধায়ী তথা পরিমাপক। এ যাবৎ TL সন্ধায়ীর উপর প্রচুর গবেষণা পরিচালনা করা হয়েছে এবং এর উপর প্রকাশনার সংখ্যা অনেক আগেই 3,000 ছাড়িয়ে গেছে এবং প্রতি বছর 200 এর বেশি সংখ্যক প্রকাশনা এর সাথে যোগ হচ্ছে। এর প্রায় অর্ধেকই পরপ্রভ বস্তু লিথিয়াম ফ্লোরাইড (LiF) নিয়ে।

তাপীয় পরপ্রভ (TL) সংঘটন প্রক্রিয়াটি আজও তেমন ভালভাবে জানা যায়নি। তবে ৫.৫ চিত্রে প্রদর্শিত প্রক্রিয়াটি এর উপর কিছুটা আলোকপাত করতে পারে।



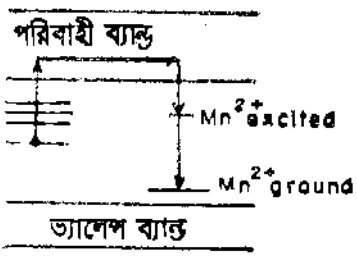
চিত্র ৫.৫ : আয়নায়নকারী বিকিরণপাতকালে TL phosper এ সংঘটিত প্রক্রিয়ার সরলীকৃত নমুনা (a), তাপায়নকালে দ্বি-আণবিক নমুনা (b), এক আণবিক নমুনা (c), পুনর্মিলনের নমুনা (d)।

পরপ্রভ পদার্থের সাথে মিথস্ক্রিয়ায় আয়নায়নকারী বিকিরণ ভ্যালেন্স ব্যান্ডস্থ (valence band) ইলেকট্রনকে পর্যাপ্ত শক্তি প্রদান করে থাকে যেজন্য এটি পরিবাহী ব্যান্ড (conduction band) C-তে উঠে যায়। এসব ইলেকট্রনের কতকগুলি সক্রিয়কারক A(γ) এর সাথে মিলিত হয়ে শক্তির অংশবিশেষ আলোকরূপে অবমুক্ত করে আর বাদবাকি ইলেকট্রনসমূহ ইলেকট্রন-ফাঁদ H(β) তে আবদ্ধ হয়ে পড়ে। অগভীর ফাঁদে আটকানো ইলেকট্রন গৃহ তাপমাত্রায়ই ফাঁদমুক্ত হয়ে হোলের (hole) সাথে মিলে পড়ে ; এ প্রক্রিয়া অনুপ্রভা (phosphorescence) নামে পরিচিত। কিন্তু গভীর ফাঁদে আটকে পড়া ইলেকট্রনসমূহ গৃহ তাপমাত্রায় অবমুক্ত হতে পারে না ; সচরাচর 100°C এর বেশি তাপ পেলে এগুলি বহুল পরিমাণে অবমুক্ত হয়। যে তাপমাত্রায় সর্বাধিক অবমুক্ত হয় তা Glow peak তাপমাত্রা নামে অভিহিত। তাপায়নের মাধ্যমে সংঘটিত এ প্রক্রিয়াকে তাই তাপ পরপ্রভ বলা হয়। ৫.৫ চিত্রে দ্বি-আণবিক নমুনা (bimolecular model) রূপে

প্রক্রিয়াটি প্রদর্শিত হলো। অবমুক্ত ইলেকট্রন হয় পুনঃ ফাঁদে আটকা পড়ে (β) অথবা সক্রিয়কের সাথে মিলিত হয়ে শক্তির অংশবিশেষ দৃশ্যমান বা অতিবেগুনি রশ্মির আকারে নিঃসৃত করে। এক আণবিক নমুনানুসারে (monomolecular model) (চিত্র ৫.৫ c) ইলেকট্রন ফাঁদ ও সক্রিয়ক এ প্রক্রিয়ায় জড়িত রয়েছে এবং বিকিরণগত হস্তান্তরণ (γ) ইলেকট্রন ফাঁদ H এর উত্তেজিত শক্তিস্তর থেকে উৎসারিত হয়।

পরপ্রভ উৎসারণ নিশ্চিত করতে সংশ্লিষ্ট পরপ্রভ পদার্থটিকে জ্ঞাত সক্রিয়কারক দ্বারা ডোপ (dope) করা হয় (চিত্র ৫.৬)। বিকিরণপাতে বর্ণ-কেন্দ্র গড়ে উঠে এবং

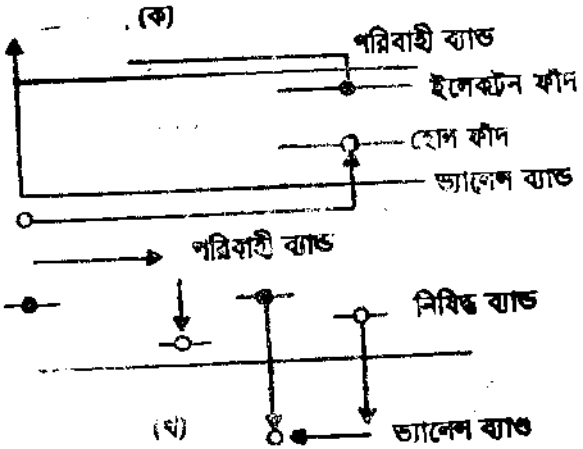
চিত্র ৫.৬ : খাদ সক্রিয়কৃত পরপ্রভ পদার্থে TL প্রক্রিয়া।



হোল (hole) Mn^{2+} আয়ন দ্বারা আবদ্ধ হয়। নির্গত ইলেকট্রন Mn^{2+} আয়নের সাথে মিলিত হয়ে তাকে পরপ্রভ নির্গমনে উত্তেজিত করে। ম্যাঙ্গানিজ সক্রিয়কৃত পরপ্রভ বস্তুসমূহের মধ্যে $CaSO_4 : Mn$ ও $CaF : Mn$ প্রধান প্রধান বটে। সক্রিয়কারক যোগে পরপ্রভ পদার্থটির নিষিদ্ধ শক্তি ব্যান্ডেও অনুমোদিত শক্তিস্তর গড়ে তোলা হয়। ফলে অপেক্ষাকৃত স্বল্প শক্তির ফোটনও ইলেকট্রনকে পরিবাহী ব্যান্ডে পৌঁছে দিয়ে প্রত্যাবর্তনকালে দৃশ্যমান আলো নির্গত করে।

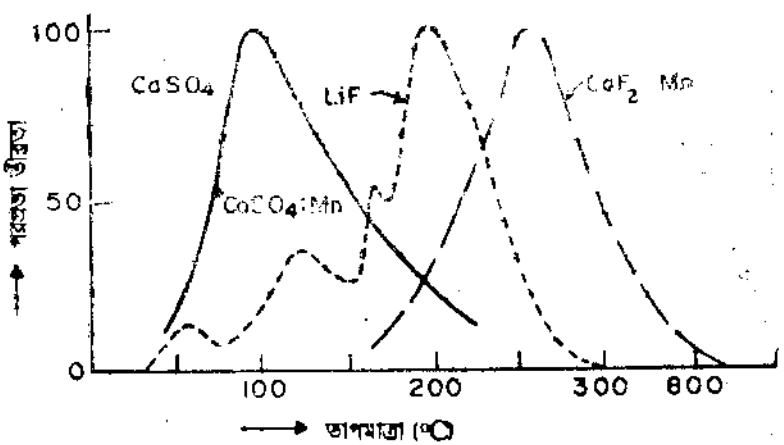
LiF, ম্যাঙ্গানিজ সক্রিয়কৃত CaF_2 , $CaSO_4$ ও, আরো বেশ কিছু অজৈব কেলাসে ইলেকট্রন ও হোল তাৎক্ষণিক পুনর্মিলন না ঘটিয়ে সুদীর্ঘকাল ফাঁদে আবদ্ধ হয়ে পড়ে থাকে (চিত্র ৫.৭)। এ ক্ষেত্রে ইলেকট্রন বিকিরণপাতে পরিবাহী ব্যান্ড থেকে ভ্যালেন্স ব্যান্ডে যায় এবং পরবর্তীতে ফাঁদ-কেন্দ্রে আটকা পড়ে। তদ্রূপ হোলসমূহকেও আটকানো হয় (চিত্র ৫.৭) দীর্ঘ সময়ের জন্য। তাপ প্রয়োগের মাধ্যমে শক্তি যোগান দিলে হোল ও ইলেকট্রন মুক্ত হয়ে পুনর্মিলিত হয়ে পরপ্রভা সৃষ্টি করে। এগুলি পুঞ্জীভূত (integrated) সন্ধায়ী অর্থাৎ নির্ধারিত সময়ব্যাপী বিকিরণপাতগ্রস্ত করার পর সার্বিক সম্পাতের (total exposure) পরিমাণ এদের দ্বারা নিরূপণ করা সম্ভব। বিকিরণপাতগ্রস্ত TL সন্ধায়ীকে TL Reader এর একটি প্রকোষ্ঠে রেখে উত্তপ্ত করলে সুনির্দিষ্ট তাপমাত্রায় পরপ্রভা নির্গত হতে

থাকে। তাপমাত্রার সাথে নির্গত পরপ্রভা সম্পর্কিত করে যে লেখচিত্র পাওয়া যায় তাকে গ্লো (glow) লেখচিত্র বলা হয় (চিত্র ৫.৮)। এ লেখচিত্র থেকে বিকিরণ-পাতের পরিমাণ নিরূপণ করা যায়। গ্লো লেখচিত্রের ক্ষেত্রফল বিকিরণপাতের



চিত্র ৫.৭ : তাপ পরপ্রভ কেলাসের শক্তি ব্যান্ড। (ক) ইলেকট্রন হোল সৃজন, (খ) মিলনের দুটি ধরন যা দ্বারা তাপীয় পরপ্রভা সৃষ্টি হয়।

সাবিক প্রভাব নির্দেশ করে। গ্লো চিত্রে একাধিক শৃঙ্গ (peak) থাকলে প্রত্যেকটি এক একটি ভিন্ন শক্তির ফাঁদ নির্দেশক বটে। বর্ধিত তাপমাত্রায় বেশ কিছু সময়ব্যাপী



চিত্র ৫.৮ : গ্লো লেখচিত্রের নমুনা।

উত্তপ্ত করলে TL চিপের মধ্যে আবদ্ধ অবশিষ্ট সকল বাহকই অবমুক্ত হয়ে যায় ফলে পূর্ববর্তী বিকিরণপাতের সকল চিহ্ন ধুয়ে মুছে যায়; এভাবে পূর্ববর্তী বিকিরণ-পাতের প্রভাবমুক্ত হওয়ার প্রক্রিয়াকে বলা হয় অ্যানিলকরণ (annealing)। তাই TL চিপ (chip) বারবার ব্যবহারযোগ্য বটে। এক একটি চিপে 50 মিলিগ্রামের মত পরপ্রভ বস্তু ক্যাপসুলাকারে আবদ্ধ থাকে। সর্বনিম্ন 0.001 mGy থেকে 1000 Gy পর্যন্ত ডোজ (dose) এদের দ্বারা নিরূপণ করা যায়।

এ যাবৎ উদ্ভাবিত TL বস্তুর সংখ্যা অসংখ্য। প্রায় 3,000 প্রাকৃতিক খনিজ বস্তুতে এ ধর্ম পরিলক্ষিত হয়েছে। মজার ব্যাপার এই যে হিরোশিমা পারমাণবিক বোমা বিস্ফোরণকালের ঘরের ছাঁদের টাইলের পরপ্রভা মেপে বিকিরণপাত নিরূপণ করা গেছে এখন। মনে রাখতে হবে যে ১৯৪৫ সালের ৬ই আগস্ট উক্ত বোমা বিস্ফোরণ ঘটে ছিল। এখানে উল্লেখ্য যে সর্বপ্রথম পরপ্রভা খোঁজা হয় লিথিয়াম ফ্লোরাইডে (LiF) আর এ যাবৎ উদ্ভাবিত পরপ্রভ সন্ধায়ীর মধ্যে এটিই সর্বাধিক ব্যবহারোপযোগী প্রমাণিত হয়েছে বিধায় এর বহুল প্রয়োগ প্রচলিত রয়েছে। LiF অনেকটা পেশীতন্তুসম (tissue equivalent) এবং পারিপার্শ্বিক অবস্থা যথা : তাপ, চাপ, আর্দ্রতা ইত্যাদি দ্বারা সহজে প্রভাবিত হয় না। ফলে বিকিরণকর্মী তথা পেশাজীবীদের বিকিরণপাত নিরূপণে এর প্রয়োগ দিন দিনই বেড়ে চলেছে এবং ক্রমানুয়ে ফটোগ্রাফিক ইমালশন ফিল্মের জায়গা দখল করে নিচ্ছে। তবে এর দ্বারা স্থায়ী রেকর্ড রাখতে পারা যাচ্ছে না বলে এর বহুল প্রচলনে কিছুটা আপত্তি রয়েছে। LiF নিয়ে বহু গবেষণা চালু রয়েছে বিশেষত জনাব হারশ (Mr. Harshaw) কর্তৃক উদ্ভাবিত রহস্যময় LiF কেলাস LiF : Mn Ti (ব্যবসায়িক নাম TLD-100, 600, 700 ইত্যাদি) বিষয়ে বছরে প্রায় 100 টি প্রকাশনা লেখা হয়ে থাকে। এতে ব্যবহৃত সক্রিয়কারকসমূহের নাম প্রকাশ করা হয় নি ব্যবসার খাতিরে। গ্লো চিত্রে প্রধান শৃঙ্গটি 180°C থেকে 220°C এর মধ্যে অবস্থান করে। নিউট্রন বিকিরণপাত নিরূপণেও LiF সন্ধায়ী গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা পালন করে চলেছে। এছাড়া CaF_2, $CaSO_4$, লিথিয়াম বোরেট ইত্যাদিরও বিশেষ বিশেষ প্রয়োগ রয়েছে। এদেরকে চাকতি আকারে অথবা পাউডার ক্যাপসুলে পুরে বিকিরণপাত-গ্রস্ত করা হয়। CaF_2 অত্যন্ত সুবেদী কিন্তু খুব স্বল্প শক্তি রেঞ্জে সাড়া (response) দিতে পারে। LiF ততোটা সুবেদী না হয়েও বিস্তৃত শক্তি রেঞ্জে সাড়া দিতে সক্ষম। পুনঃপুনঃ ব্যবহারোপযোগী বলে এদের ব্যবহারে ব্যয়ভার স্বল্প। বিকিরণ-পাতে সৃষ্ট প্রভাবাদি বিনষ্ট করে ডোজ পাঠ গ্রহণ করতে হয় বলেই বারবার ব্যব-হারে স্বল্প ব্যয়ভারের সুবিধাটুকু মেলে।

উত্তম TL সন্ধায়ী হওয়ার জন্য প্রতিপ্রভ বস্তুটির নিম্নোক্ত বৈশিষ্ট্যাদি থাকা উচিত :

(১) ইলেকট্রন বা হোলের উচ্চ গাঢ়ত্ব

(২) উচ্চ দক্ষতার পরপ্রভা,

(৩) স্বাভাবিক তাপমাত্রায় ফাঁদে আবদ্ধ ইলেকট্রন বা হোলের দীর্ঘকালীন স্টোরেজে (storage) থাকা ,

(৪) চালনার সারল্যতা ও ফলাফল উপলব্ধির জন্য একই ধরনের ফাঁদের অধিকতর সরল বন্টন (distribution)

(৫) সঞ্চায়ীর সাথে পরপ্রভ বর্ণালীর মানানসই হয় এমন সঠিক বিতরণ,

(৬) ফাঁদ সক্রিয়কারক ও host lattice এর স্থায়িত্বশীলতা অর্থাৎ বিকিরণপাত ফাঁদ ভরাট করবে কিন্তু কোনোভাবেই নতুন ফাঁদ বা সক্রিয়ক সৃষ্টি বা ধ্বংস করবে না।

প্রয়োগ স্বার্থে আরো কিছু প্রয়োজন (requirements) জুড়ে দেয়া যায়।

৫.২.৩ সিরেনকভ (cerenkov) সঞ্চায়ী ঃ প্রতিসরণাঙ্ক এক এর অধিক এমন আলোক স্বচ্ছ মাধ্যমের ভিতর দিয়ে তড়িৎ আধানযুক্ত কণিকা দ্রুত অতিক্রমণকালে যে আলো নির্গত হয় তার উপর ভিত্তি করে এক ধরনের সঞ্চায়ীর প্রচলন হয়েছে। সংশ্লিষ্ট কণিকাটির বেগ আলোর বেগকে ছাড়িয়ে গেলেই শুধু এ আলো নির্গত হয়। জনাব সিরেনকভ প্রথম এটি পর্যবেক্ষণ করেছিলেন বলে এর এমন নামকরণ ; নিঃসৃত আলোক সিরেনকভ আলো নামে অভিহিত হয়ে থাকে। উচ্চ শক্তির পদার্থবিদ্যা সংক্রান্ত পরীক্ষণেই শুধু এ ধরনের সঞ্চায়ীর প্রয়োগ প্রচলিত। কয়েক দশক MeV রেঞ্জের শক্তির কণিকা ও ইলেকট্রনই শুধু সিরেনকভ আলো নির্গমনে সক্ষম। ফলে প্রাথমিক (Primary) দ্রুত ইলেকট্রন যেমন বিটা কণিকা অথবা দ্বিতীয় পর্যায়িক (secondary) ইলেকট্রন সন্ধানে এ সঞ্চায়ীর প্রয়োগ রয়েছে।

সাধারণ সিন্টিলেশন সঞ্চায়ীর সাথে সিরেনকভ সঞ্চায়ীর মিল এই যে উৎপাদিত আলো সিরেনকভ মাধ্যমের সংস্পর্শে স্থাপিত ফটোমাল্টিপ্লায়ারের সাহায্যেই বৈদ্যুতিক সংকেতে রূপান্তরিত হয়। তবে এর কতিপয় বিশেষ বৈশিষ্ট্য নিম্নরূপ :

(১) কোনো মাধ্যমে সিরেনকভ আলো সৃজনের জন্য কণিকাটির সুনির্দিষ্ট সর্বনিম্ন বেগ থাকতেই হবে ; সুতরাং এ সঞ্চায়ীর রয়েছে সহজাত পার্থক্যকরণ ক্ষমতা যা আর কোনো সঞ্চায়ীর নেই।

(২) অত্যল্প সময়ব্যাপী আলো নিঃসৃত হয় যে সময়ে যাত্রারম্ভ বেগ থেকে কণিকাটি সূচন (threshold) বেগের নিম্নে মন্থরিত হয় ($\sim 10^{-11}$ সে.) সুতরাং এ সঞ্চায়ীটি ব্যতিক্রান্তভাবে দ্রুত।

(৩) এর সর্বাধিক অসুবিধা হলো উৎসারিত আলোর পরিমাণ অতি স্বল্প। ইলেকট্রনের প্রতি MeV-তে কয়েকশত ফোটন নিঃসৃত হয় যা সিন্টিলেশনের তুলনায় প্রায় ১০০ গুণ কম।

(৪) সিরেনকভ (Cerenkov) ফোটন বেগের দিকে নির্গত (emission) হয়, সবদিকে নয়।

(৫) প্রতি তরঙ্গ দৈর্ঘ্যে আলোক উৎপাদন $1/\lambda^2$ এর সমানুপাতিক হয়।

উত্তম আলোক প্রেরণ ধর্মবিশিষ্ট বস্তু মাধ্যমকেই সিরেনকভ সন্ধায়ীর জন্য বেছে নেয়া হয় সচরাচর ; এর কোনো সিন্টিলেশন বৈশিষ্ট্য থাকবে না। বাছাই-কৃত বস্তুটির প্রতিসরণাঙ্ক ১ থেকে ১.৮ পর্যন্ত হয়। ১.৪৭ এর অধিক প্রতিসরণাঙ্ক-ধারী বস্তু যেমন লুসাইট (পারসপেক্স), গ্লাস এবং কেলাসিত স্বচ্ছ বস্তুই এ সন্ধায়ীর জন্য বাছাই করা হয়ে থাকে।

৫.২.৪ **ফটোগ্রাফিক ইমালশন** (photographic emulsion) **সন্ধায়ী :** তেজস্ক্রিয় বিকিরণ তথা এক্স-রে এর প্রথম সন্ধান লাভ ঘটে ফটোগ্রাফিক ইমালশন দ্বারা ১৮৯৫ সালে। এক্স-রের উদ্ভাবক জনাব রন্টগেনের ছিল ফটোগ্রাফির খুব সখ। একদিন তড়িৎ ক্ষরণনলে ক্যাথোড রশ্মি নিয়ে গবেষণার প্রাক্কালে তিনি তার চাবির গোছাটি নলের পার্শ্বে রাখা ফটোগ্রাফিক প্লেটের উপরে অসতর্কভাবে রেখে দেন ; আর তাতেই ঘটে গেল আশ্চর্য এক্স-রে রশ্মি আবিষ্কারের সূত্রপাত। পরবর্তীতে বহির্দৃশ্যের কিছু ছবি তুলে প্রস্ফুটনের পর ফটোগ্রাফে তার চাবির ছড়ার ছবি দেখে তিনি ভাবতে লাগলেন তা কেমন করে হলো। ধীরে ধীরে তিনি স্মরণ করলেন যে তড়িৎ ক্ষরণ নলে ক্যাথোড রশ্মি নিয়ে কাজ করার সময় উক্ত চাবির গোছাটি পার্শ্বে রাখা ফটোগ্রাফিক প্লেটের উপর রাখা ছিল। তিনি ছিলেন মেধাবী সার্থক গবেষক ; তিনি ধারণা করলেন নিশ্চয়ই তড়িৎ ক্ষরণ নল থেকে কোনো অজানা শক্তিশালী সুদূর প্রবেশী রশ্মি নির্গত হয়ে ফটোগ্রাফিক প্লেটে এসে পড়েছে আর তাতেই ফটোগ্রাফিক প্লেটে চাবির ছবি উঠেছে। তিনি তখন উঠেপড়ে লেগে গেলেন অনুসন্ধান কাজে, বিছানা নিয়ে চলে এলেন গবেষণাগারে। দীর্ঘ গবেষণার পরে তিনি দেখলেন তার ধারণা ষোল আনা ঠিক। তিনি তদবধি অজানা এ রশ্মির নামকরণ করলেন এক্স-রে (X-ray), ইংরেজি বর্ণমালার 'X' বর্ণটি দিয়ে। এক্স-রের ন্যায় তেজস্ক্রিয়তা (Radioactivity) সন্ধানেও ফটোগ্রাফিক ইমালশন অগ্রণী ভূমিকা পালন করে। ফরাসী পদার্থবিদ জনাব হেনরী বেকারেল ঘটনাক্রমে ফটোগ্রাফিক ফিল্ম ও ইউরেনিয়াম যৌগ একই

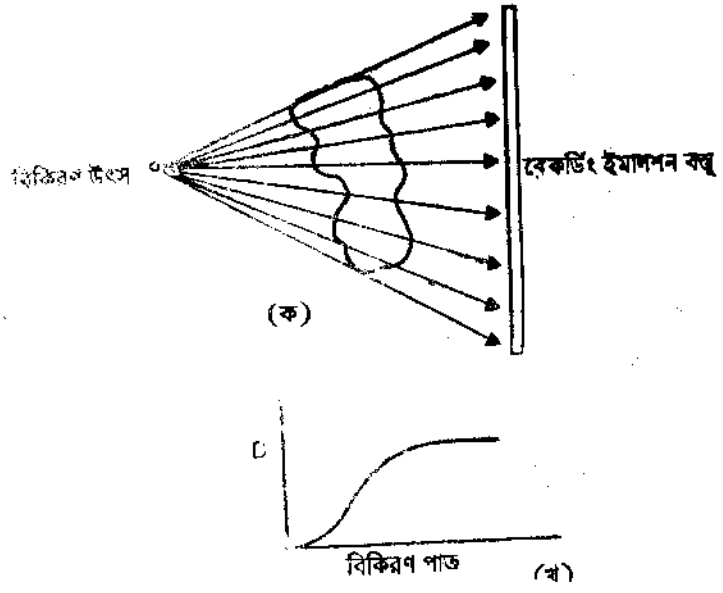
দেরাজে আবদ্ধ করে রাখেন কিছুকাল যাবৎ। পরবর্তীতে উক্ত ফটোগ্রাফিক প্লেটে অটো-এক্সপোজারের (auto-exposure) উৎস খুঁজতে খুঁজতে দেখতে পান যে ইউরেনিয়াম যৌগ থেকে স্বতঃস্ফূর্তভাবে শক্তি বিচ্ছুরিত হয়ে ফটোগ্রাফিক প্লেটে ছাপ ফেলেছে। উক্ত ঘটনাদ্বয় থেকে স্পষ্টত বুঝা যায় যে তেজস্ক্রিয়তা তথা বিকিরণপাত সন্ধান ও পরিমাপনে এ সন্ধায়ী গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা পালন করে। পেশাজীবিদের বিকিরণপাত নিরূপণ তথা শনাক্তকরণে (monitoring) এ সন্ধায়ীর ব্যাপক ব্যবহার প্রচলিত রয়েছে। কণিকার (particulats) তেজস্ক্রিয় বিকিরণের ভর, শক্তি, ত্বরবেগ, ত্বরণ, তীব্রতা, আধান প্রভৃতি বৈশিষ্ট্য তথা পূর্ণাঙ্গরূপ উদঘাটনে নিউক্লিয়ার ইমালশন সন্ধায়ীর জুড়ি নেই। এক কথায় কোনো একক সন্ধায়ী ব্যবহার করে তেজস্ক্রিয় বিকিরণের সমুদয় বৈশিষ্ট্য উদঘাটনের উপায় ইমালশন টেকনিক (technique) অবলম্বন করা। এবার দেখা যাক এটি কি এবং কিভাবে কাজে লাগানো হয়।

সাধারণ ফটোগ্রাফিক সন্ধায়ী গ্লাস অথবা সেলুলোজ এসিটেট ফিল্মের (cellulose acetate film) গাত্রে জেলেটিন মেট্রিক্স আলম্বিত (suspended) দানাদার সিলভার ব্রোমাইডের প্রলেপ ছাড়া আর কিছু নয়। বিকিরণপাতে সিলভার ব্রোমাইড ধাতব রূপায় পরিণত হয়ে বিকিরণের পদযাত্রার ছাপের সুপ্ত ছবির জন্ম দেয়। বিকিরণপাতগ্রস্ত ফিল্মকে এক বিশেষ রাসায়নিক দ্রব্যে ডুবিয়ে বিকিরণপাতে সৃষ্ট এ ধাতব রূপাকে ফিল্মের সাথে আটকিয়ে (fix) নেয়া হয়; অতঃপর ফিল্মটিকে অপর একটি রাসায়নিক দ্রবণে ডুবিয়ে বিকিরণপাতে অনাহত (unaffected) সিলভার ব্রোমাইড ডুবিয়ে ধুয়ে মুছে ফেলা হয়। ফলে সুপ্ত ছবিটি পরিস্ফুটিত হয়ে উঠে।

বিকিরণ সন্ধান ও পরিমাপনে নিয়োজিত ফটোগ্রাফিক ইমালশনের প্রয়োগকে দুটি শ্রেণিতে ভাগ করা যায়, যথা :

(১) বিকিরণপাতের ফলে ফিল্মে উৎপন্ন সামগ্রিক কৃষ্ণতার (blackness) প্রয়োগ এবং (২) প্রতিটি বিকিরণপাতে সৃষ্ট আলাদা ট্র্যাকের (track) প্রয়োগ। প্রথমোক্ত প্রয়োগ ক্ষেত্রটি হচ্ছে বিকিরণ লেখন (Radiography) যার রয়েছে বিশাল কর্মপরিধি। বিকিরণ লেখনে বিকিরণ রশ্মি বীমের (beam) বস্তু মাধ্যমের ভেতর দিয়ে প্রেরিত তীব্রতার (intensity) বিম্ব (image) রেকর্ড করা হয়ে থাকে। তজ্জন্য ব্যবহৃত বিশেষ ধরনের (specialized) ফিল্ম সাধারণ ফটোগ্রাফিতে ব্যবহৃত ফিল্মের চেয়ে খুব একটা বেশি ভিন্ন কিছু নয়। কিন্তু কণিকা ট্র্যাক রেকর্ডের জন্য ব্যবহৃত হয় নিউক্লিয়ার ইমালশন যার পুরুত্ব বেশি এবং গাঠনিক উপাদানও সম্পূর্ণ ভিন্ন হয় সাধারণ ফটোগ্রাফিক ইমালশন থেকে। নিউক্লীয় পদার্থবিদ্যার পরীক্ষণ কাজেই এর ব্যবহার সীমাবদ্ধ।

(ক) বিকিরণলৈখিক ফিল্ম (Radiographic film) : বিকিরণলৈখিক পরিমাপন পদ্ধতির একটি নকশা ৫.৯ চিত্রে দেখানো হলো। চিত্রে দেখা যায় বিকিরণ উৎস থেকে আগত রশ্মি বস্তুর গায়ে পড়ছে, এতে রেকর্ডিং ইমালশনে বস্তুটির একটি বিম্ব তৈরি হবে। বিকিরণটি এক্স-রে, গামা-রে, ব্রেমসস্ট্রাহলুং বা নিউট্রন রশ্মি হতে পারে যা বিকিরণ লেখনের জন্য ব্যবহৃত হয়ে



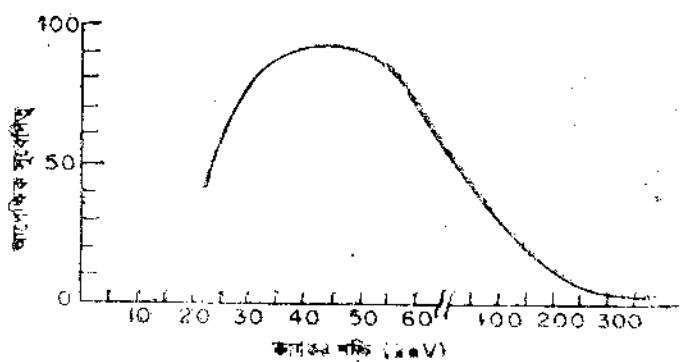
চিত্র ৫.৯ : (ক) বিকিরণ লৈখিক বিম্ব সৃজনের উপাদানসমূহ।
(খ) বিকিরণপাত লেখচিত্র।

থাকে। বিকিরণ লৈখিক ইমালশন পুরুত্বে ১০—২০ মাইক্রোমিটার হয় এবং দানার ব্যাস ১ মাইক্রোমিটারের মত হয়ে থাকে। সিলভার হ্যালাইডের গাঢ়ত্ব ওজনানুপাতে প্রায় 80%। উচ্চ সংবেদনশীলতা অর্জনের জন্য ফিল্মের উভয় পিঠেই ইমালশন প্রলেপ দেয়া হয়। নিম্নের নকশা (খ) চিত্রে সংবেদনশীলতার নমুনা রেখাচিত্র দেখানো হলো যেখানে 'D' ডেন্সিটোমিটারে মাপা ফিল্মে উদ্ভূত কালোর ঘনত্ব নির্দেশ করে। রেখাটিতে তিনটি স্পষ্ট অঞ্চল দেখতে পাওয়া যাচ্ছে। নিম্ন বিকিরণ-পাতে অতি স্বল্প সংখ্যক সিলভার হ্যালাইড দানা আহত হয়েছে বলে ঘনত্বও স্বল্প; অপরদিকে অতি উচ্চ বিকিরণপাতে ঘনত্ব সংপৃক্ত হয়ে পড়েছে কারণ বিকিরণপাতে তথায় বিদ্যমান ইমালশনস্থ সকল দানাই (grain) ইতোমধ্যে আহত হয়ে গেছে

অর্থাৎ অতি বিকিরণপাত (overexposure) ঘটেছে। এ দু'চরম অবস্থার মধ্যবর্তী-স্থলে বিকিরণপাতের সাথে উদ্ভূত ঘনত্ব প্রায় রৈখিকভাবে বেড়েছে।

মেডিকেল ও অন্যান্য প্রয়োগ ক্ষেত্রে আপতিত বিকিরণের তীব্রতা বেশির ভাগই সীমাবদ্ধ ও স্বল্প মাত্রার বলে intensifying screen এর সাহায্য নেয়া হয়ে থাকে।

ব্যক্তিগত বিকিরণপাতমিটার ফিল্ম ব্যাজ (personal dosimeter film badge) ঃ ব্যক্তিগত বিকিরণপাত নিরূপণে ফটোগ্রাফিক ইমালশনের ব্যাপক প্রচলন রয়েছে। এক্ষেত্রে ফটোগ্রাফিক ইমালশন ফিল্মের ক্ষুদ্র এক টুকরাকে আলোক-অপ্রবেশ্য মোড়কে আবদ্ধ করে বিকিরণপাত পরিমাপনের কাজে লাগানো হয়ে থাকে। ডেন্টাল রেডিওগ্রাফিতে ব্যবহৃত ফিল্মের সদৃশ উক্ত ইমালশন টুকরাটিকে প্লাস্টিক নির্মিত ধারকে (holder) পুরে ক্লিপের সাহায্যে বিকিরণপাতগ্রাহীর পরিধেয় পোষাকে বা অ্যাপ্রোনে আটকে ঝুলিয়ে রাখা হয়। নির্দিষ্টকালব্যাপী বিকিরণপাত-গ্রস্ত হওয়ার পর এ ইমালশন টুকরাটিকে যথাবিহিত প্রক্রিয়াকরণ (processing) করে এর কালো হওয়ার গাঢ়ত্ব (density of blackness) ডেন্সিটোমিটার দিয়ে মেপে সংশ্লিষ্ট ব্যক্তির বিকিরণপাত মাত্রা (dose) নিরূপণ করা হয়। কিন্তু কিভাবে? সেজন্য পূর্বেই জ্ঞাত বিকিরণপাত ক্ষেত্রে (dosefield) ফটোগ্রাফিক ইমালশন ফিল্ম-টিকে বিকিরণপাতগ্রস্ত করে ফিল্মে তদ্দরুন সৃষ্ট কৃষ্ণতার গাঢ়ত্ব ডেন্সিটোমিটার দিয়ে মেপে জ্ঞাত ডোজ বনাম গাঢ়ত্ব ক্রমাঙ্কন রেখা (calibration curve) গঠন করা হয়। অতঃপর প্রক্রিয়াজাত বিকিরণপাতগ্রস্ত ফিল্মের ঘনত্ব মেপে পূর্বেই প্রস্তুতকৃত ক্রমাঙ্কন রেখায় উক্ত ঘনত্বের বিপরীতে প্রাপ্ত ডোজই সংশ্লিষ্ট ব্যক্তির ডোজ সমতুল। বিকিরণপাত যে বাস্তব অবস্থাধীনে সংঘটিত হয় ডোজ বনাম গাঢ়ত্ব ক্রমাঙ্কনের কাজটি প্রায় সমঅবস্থাধীনে করা গেলে সংবেদনের ভিন্নতা বা হেরফের ও প্রক্রিয়াজাতকরণ পদ্ধতিজনিত ভ্রম পরস্পরকে বাতিল করে দিতে পারে।



চিত্র ৫.১০ : বিকিরণের কার্যকর শক্তি বনাম সংবেদিতের নমুনা চিত্র।

ফটোগ্রাফিক ইমালশন সন্ধায়ীর সুবেদিত্ব (sensitivity) বিকিরণপাতের শক্তির উপর বড় বেশি নির্ভরশীল। নিম্ন শক্তির বিকিরণে (40keV-60keV) সুবেদিত্ব সর্বাধিক (চিত্র ৫.১০)। এর অন্যতম প্রধান কারণ উক্ত শক্তির ফোটনের ক্ষেত্রে রূপার ফটো-তড়িৎ (photo-electric) প্রক্রিয়ার প্রভাব উচ্চ কিন্তু উচ্চ শক্তির ফোটনের ক্ষেত্রে উক্ত প্রক্রিয়ার প্রভাব দ্রুত হ্রাস পায় (চিত্র ৫.১০)।

ফটোগ্রাফিক ইমালশন ফিল্মের ধারকটিতে (holder) বিভিন্ন ধাতুর তৈরি ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র টুকরা ছাঁকনিরূপে ব্যবহৃত হয়। যেমন টিন ও সীসার সঙ্করের ছাঁকনিটি (filter) নিম্ন ও উচ্চ শক্তির বিকিরণের প্রতি সংবেদীতার পার্থক্য নিরসনে সহায়তা করে। বিটা ও গামা বিকিরণপাত-জনিত ডোজ পরিমাপনের জন্য রয়েছে ফিল্ম ব্যাজের উন্মুক্ত জানালার নিচের ফিল্ম এলাকা এবং গামা বিকিরণপাতের জন্য সীসার টুকরার নিচেকার ফিল্ম এলাকার ডোজ পরিমাপন করা; উক্ত দু এলাকার ডোজ পার্থক্য থেকে আলাদা আলাদাভাবে গামা ও বিটা রশ্মির জন্য ডোজ নির্ণয় করা যায়। একটুকরা ক্যাডমিয়াম পাতের ছাঁকনির নিচের গাঢ়ত্ব মেপে ধীরগামী নিউট্রনের ডোজ মাপা যায়; আর দ্রুতগামী নিউট্রনপাতের ডোজ সরাসরি মাপা না গেলেও প্রোটন বিক্ষেপণে সৃষ্ট ট্র্যাক মাইক্রোস্কোপে পড়ে তজ্জনিত বিকিরণপাত নিরূপণ করা সম্ভব।

(খ) নিউক্লিয়ার ইমালশন : বিকিরণপাতের প্রতিটি কণিকার ট্র্যাক রেকর্ড ও পরিমাপ করতে হলে বিশেষ সূত্র মোতাবেক প্রস্তুতকৃত নিউক্লিয়ার ইমালশন ব্যবহৃত হয়ে থাকে। এক্ষেত্রে ইমালশনের পুরুত্ব ৫০০ মাইক্রোমিটার পর্যন্ত বর্ধিত করা হয়ে থাকে যেন অনেক সংখ্যক ট্র্যাকের সম্পূর্ণ অংশ রেকর্ড করা যায়। প্রস্ফুটিত দানার (grains) ঘনত্ব বৃদ্ধির স্বার্থে সিলভার ব্রোমাইডের গাঢ়ত্বও ৮০% এ উন্নীত করা হয়। এ অস্বাভাবিক পুরুত্বের ইমালশন প্রস্তুতকালে সর্বত্র সমসত্বতা (uniformity) রক্ষার খাতিরে অত্যন্ত সতর্কতা অবলম্বন প্রয়োজন হয়। মাইক্রোস্কোপের নিচে আয়নায়নকারী কণিকার চলার পথটি প্রস্ফুটিত রূপার দানার অবিচ্ছিন্ন রেখার মত দেখায়। ট্র্যাকের দৈর্ঘ্য সংশ্লিষ্ট কণিকাটির বেগ বা শক্তি নির্দেশ করে আর গাঢ়ত্ব প্রতি একক দৈর্ঘ্যে শক্তি হস্তান্তর তথা কণিকাটির ধরন নির্দেশ করে। ইমালশনে সৃষ্ট ট্র্যাক একটি স্থায়ী রেকর্ড বটে।

৫.২.৫ নিউট্রনপাতে সক্রিয়কৃত ধাতবপাত সন্ধায়ী (Neutron activated Foil deteetor) : নিউট্রনপাতে অতি পাতলা ধাতবপাতে তেজস্ক্রিয়তা আবিষ্ট হয়ে থাকে। ধাতবপাতকে নিউট্রন প্রবাহ পথে স্থাপন করে সম্পাতগ্রস্ত (exposed) করা হয়

কিছু সময় ধরে। অতঃপর আবিষ্ট তেজস্ক্রিয়তা প্রচলিত পদ্ধতিতে সন্ধান ও পরিমাপন করা হয়ে থাকে। আর এ থেকে নিউট্রন ফ্লাক্সে (flux) বিদ্যমান নিউট্রনের সংখ্যা অথবা শক্তি বন্টন বৈশিষ্ট্য জানা যায়। এ অবস্থায় ব্যবহৃত বস্তুটিকে সক্রিয়করণ সন্ধায়ী (activation detector) নামে অভিহিত করা হয়।

নিম্ন শক্তির নিউট্রনের বিক্রিয়ার সম্ভাবনা সর্বোচ্চ বিধায় ধীর গতির নিউট্রন সন্ধানে সক্রিয়কৃত ধাতবপাত সন্ধায়ীর প্রয়োগ সর্বাধিক। উচ্চ মানের সংবেদিত্ব লাভের জন্য উচ্চ নিউট্রন বিক্রিয়া সম্ভাবনাধারী বস্তুকে এ সন্ধায়ীর বস্তু হিসেবে বেছে নেয়া হয়। যেহেতু তেমন বস্তুতে নিউট্রনের গড় নির্বাধ পথ (mean free path) অতি স্বল্প তাই ধাতবপাতের পুরুত্ব খুব পাতলা হওয়া প্রয়োজন।

৫.২.৬ **পথচিহ্ন-ক্ষয় সন্ধায়ী** :আয়নায়নকারী তড়িৎ আধানবাহী কণিকা ডাইইলেকট্রিক (diclectrie) পদার্থের ভেতর দিয়ে অতিক্রমকালে বস্তুস্থ ইলেকট্রনের নিকট হস্তান্তরিত শক্তি চলতি পথে আহত অণুর একটি সরল পথ চিহ্ন সৃষ্টি করে থাকে। কোনো কোনো বস্তুতে সৃষ্ট উক্ত ট্র্যাকটিকে শক্তিশালী অম্ল বা ক্ষার দ্রবণের সাহায্যে ইচিং (etching) করে দৃশ্যমান করে তোলা যায়। এ প্রক্রিয়াটিকে ক্ষয় সাধন বলা হয়। বস্তুটির সারা গাত্রই এ প্রক্রিয়ায় আহত হয় কিন্তু যে যে স্থলে কণিকার ট্র্যাক ঘটেছে তা দ্রুত ক্ষয় পায়। ট্র্যাকটি তখন বস্তুগাত্রে বড় বড় ক্ষয়খাদে পরিণত হয় যা যে কোনো সাধারণ মাইক্রোস্কোপ দ্বারা দেখা সম্ভব। এ ধরনের বস্তুকে ট্র্যাক-ইচ (track-etch) সন্ধায়ী বলা হয়। এতে সুবিধা এই যে এটি সহজ-সরল এবং সস্তা। এ ক্ষেত্রে একক দূরত্বে শক্তি হস্তান্তরণের ($-dE/dx$) সূচনা শক্তির (threshold) সুনির্দিষ্ট মান রয়েছে যা সকল অবস্থাতেই ইলেকট্রন ট্র্যাকের একক দূরত্বে হস্তান্তরিত শক্তির চেয়ে অধিকতর হয়। কাজেই গামারশ্মি বা দ্রুতগামী ইলেকট্রন এর দ্বারা সন্ধান করা যায় না। হালকা আয়নায়নকারী তড়িৎবাহী কণিকা যেমন প্রোটন বা নিউট্রনও এর দ্বারা শনাক্ত করা যায় না। আপতিত কণিকাটি নিজেই ঘর্ষণের মাধ্যমে গর্ত করতে পারে অথবা ট্র্যাকে সৃষ্ট শক্তিশালী ডেল্টা রশ্মি এ কাজ সম্পন্ন করে থাকে, ডেল্টা রশ্মির রেঞ্জ প্রায় ৫ ন্যানোমিটার হয়। অম্ল বা ক্ষার দ্রবণে প্রক্রিয়াজাত করার পর ট্র্যাকের ব্যাস ১০—২০ মাইক্রোমিটার পর্যন্ত বৃদ্ধি পায়।

অজৈব কেলাসিত কঠিন পদার্থ ও গ্লাস এবং জৈব কঠিন পদার্থ যেমন পলিমার এ সন্ধায়ীর জন্য উপযোগী। প্রথমোক্ত শ্রেণির পদার্থের মধ্যে অভ্র (mica) ও ফ্লিন্ট গ্লাস সবচেয়ে জনপ্রিয় আর শেষোক্ত শ্রেণির পলিকার্বনেট ও পলিস্টার

ফিল্ম সচরাচর ব্যবহৃত হয়ে থাকে। রূপান্তরক হিসেবে ^{6}Li বা ^{10}B ব্যবহার করে আলফা কণিকা উৎপাদনের মাধ্যমে নিউট্রন সন্ধানও সম্ভব হবে।

৫.২.৭ দেহস্থ তেজস্ক্রিয়তা মনিটর (Wholebody Radioactivity Monitor) ঃ দেহস্থ তেজস্ক্রিয়তা দূষণ তথা বিকিরণপাতগ্রস্ততা নিরূপণ করা অত্যন্ত জরুরি। কারণ এটি ভেতরে থেকে দেহকে সারাক্ষণই বিকিরিত করে বলে ঝুঁকির পরিমাণ অনেক বেশি। সাধারণত যারা অনাবদ্ধ (unsealed) তেজস্ক্রিয় পদার্থ নিয়ে কাজ করে বা তেজস্ক্রিয় পদার্থ উৎপাদনকারী যন্ত্রপাতি যথা পরমাণু চুল্লী মেরামত ও রক্ষণাবেক্ষণের কাজে নিয়োজিত থাকেন তাদের তেজস্ক্রিয় পদার্থ দেহস্থ হতে পারে। তাই তাদের তেজস্ক্রিয় দেহভার (Radioactive body burden) নিরূপণ করা অত্যাবশ্যকীয়। এতদ্ব্যতীত শ্বসন, তেজস্ক্রিয় খাদ্য গ্রহণ, দেহগাত্র দিয়ে শোষণ ইত্যাদি উপায়েও দেহে তেজস্ক্রিয় পদার্থ ঢুকে পড়তে পারে। সাধারণত পারমাণবিক কৌশল (devices) বিস্ফোরণ ও দুর্ঘটনায় তেজস্ক্রিয় পদার্থ ছড়িয়ে পড়লে এমনটা হতে দেখা যায়। দেহস্থ তেজস্ক্রিয় পদার্থ থেকে নির্গত গামা রশ্মি বা উচ্চ শক্তির ব্রেমসস্ট্রাহলুং (bremsstrahlung) সন্ধান ও পরিমাপন করে বিকিরণপাত সরাসরি নিরূপণ করা যায় whole body counter (WBC) ব্যবহার করে। এযাবৎ আলোচিত অন্যান্য সন্ধায়ীর সাথে এর পার্থক্য হচ্ছে জীবদেহটি এখানে তেজস্ক্রিয় উৎস হিসেবে কাজ করে; আর যেহেতু দেহ থেকে উদ্ভূত বিকিরণ নানাভাবে হ্রাসকৃত (attenuates) হয় তাই সন্ধানীতব্য বিকিরণের পরিমাণ অতি স্বল্প। ফলে WBC কে অত্যন্ত নিম্ন পটভূমি (low background) বিকিরণ এলাকায় স্থাপন করতে হয় এর সংবেদীত্ব বাড়ানোর জন্য।

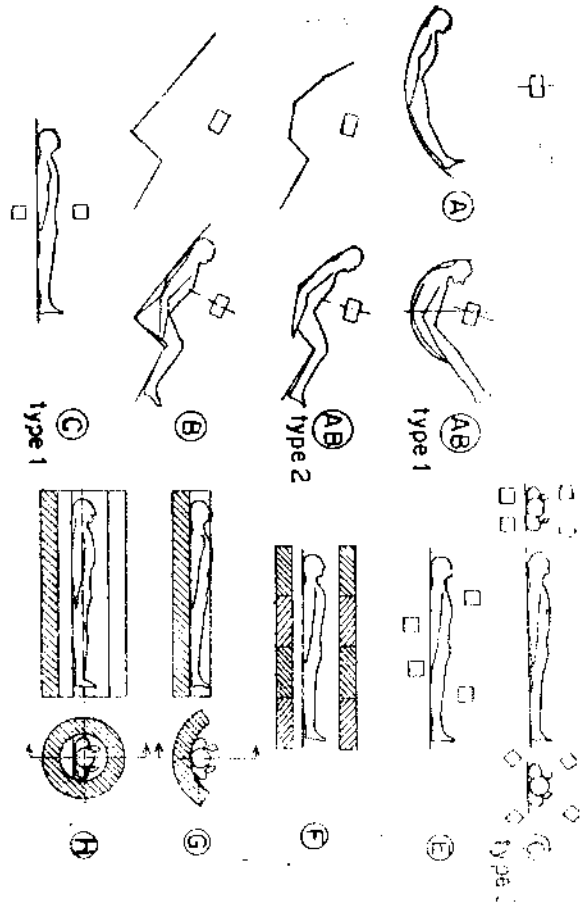
দেহস্থ তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপনের নানাবিধ কৌশল রয়েছে। এযাবৎ নানা ধরনের WBC উদ্ভাবিত হয়েছে; এদের কোনোটিতে সংশ্লিষ্ট ব্যক্তির বসার, কোনোটিতে শোবার, কোনোটিতে হেলান দেওয়ার আর কোনোটিতে অর্ধশায়িত অবস্থায় এক বা একাধিক প্রচলিত সন্ধায়ীর সমন্বয়ে গঠিত সিস্টেমের সাহায্যে দেহস্থ তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপনের ব্যবস্থা রয়েছে। আবার কোনো কোনো ব্যবস্থায় সন্ধায়ীকে সামনে পেছনে চালনা করে বা বৃত্তাকারে চারপাশে উপরে নিচে সামনে পেছনে ঘুরিয়ে বা বিছানা সামনে পেছনে ঘুরিয়ে (move), স্ক্যানিং (scanning) করে তেজস্ক্রিয়তা মনিটরিং করা হয়। এ ধরনের মনিটর সাধারণত শিল্ডকৃত (shielded) কক্ষে স্থাপন করা হয়। ক্ষেত্র বিশেষে বিছানা বা চেয়ার এবং সন্ধায়ীকে শিল্ডেড করা হয়ে থাকে। সন্ধায়ী হিসেবে সাধারণত তুলনামূলকভাবে বেশি দক্ষতাধারী সন্ধায়ী যেমন NaI(Tl) কেলাস সচরাচর ব্যবহার করা হয়ে থাকে।

নানাবিধ জ্যামিতিক গঠন (geometrical configuration) ও সজ্জায়ী সজ্জা (arrangement) সংবলিত WBC রয়েছে। তন্মধ্যে গুরুত্বপূর্ণ কতিপয় হচ্ছে :

(ক) একক সন্ধায়ী বিশিষ্ট বৃত্ত চাপাকৃতির সজ্জা (single detector arc arrangement)।

(খ) একক সন্ধায়ীর চেয়ার (single-detector chair) সজ্জা

(গ) একক সন্ধায়ীর স্ক্যানিং ব্যবস্থা (single-detector scanning system)



চিত্র ৫.১১ : অক্ষর দ্বারা চিহ্নিত Subject-detector অবস্থান নির্দেশক কোড (code) ও উপাত্ত, জটিল অবস্থান-অবস্থা নকশা দ্বারা দেখানো হয়েছে।

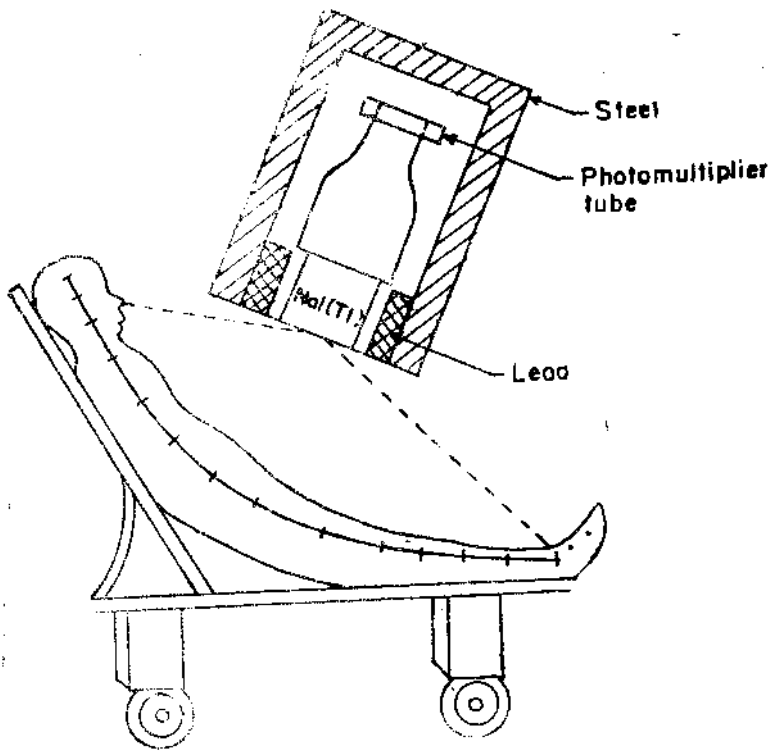
(ঘ) বহু-সন্ধায়ীর স্ক্যানিং ব্যবস্থা।

(ঙ) 2π-Large detector

(চ) 4π-Large detector

Subject-detector গঠন সংবলিত কতিপয় WBC সজ্জা ৫.১১ চিত্রে দেখানো হয়েছে। ব্যবহারকারী নিজের সুবিধা মোতাবেক চিত্রে প্রদর্শিত যে কোনো ব্যবস্থা অথবা এদের কতিপয়ের সমবায়ে তৈরি WBC স্থাপন করতে পারেন। অবশ্যই যথাযথ ক্রমাঙ্কন ও প্রমিতকরণের মাধ্যমে এটি ব্যবহার করা প্রয়োজন।

বাংলাদেশ পরমাণু শক্তি কমিশন এর সাভারস্থ পরমাণু গবেষণা প্রতিষ্ঠানের বিকিরণ নিয়ন্ত্রণ ও তেজস্ক্রিয় বর্জ্য ব্যবস্থাপনা (Radiation Control & Waste

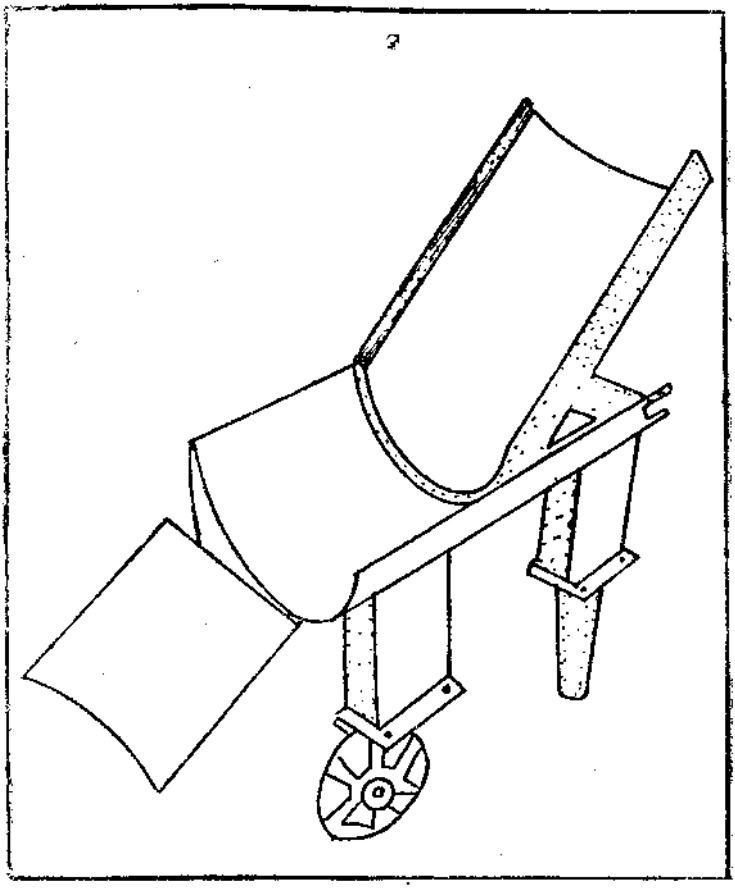


চিত্র ৫.১২ : প্রমাণ সাইজের মানব সংবলিত Subject—Detector এর লম্বচ্ছেদ।

Management) গবেষণাগারে shielded single NaI(TI) সন্ধায়ী বিশিষ্ট self-shielded হেলানো চেয়ারধারী একটি WBC স্থাপন করেছে। অত্র গ্রন্থ প্রণেতা

স্থানীয় উপকরণ ব্যবহার করে স্থানীয়ভাবে উচ্চ WBC ডিজাইন, উদ্ভাবন ও নির্মাণ করেছেন (চিত্র ৫.১২)। বিভিন্ন আকারের ও ওজনের প্লাস্টিক ফ্যান্টম (phantom) ব্যবহার করে উক্ত WBC টিকে ক্রমাঙ্কিত ও প্রমিত (standardized) করা হয়েছে। এখন এর গঠন পদ্ধতি ও কার্যপ্রণালীর উপর আলোকপাত করা যাক।

দেহস্থ তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপনে প্রধান অন্তরায় আশেপাশের পরিবেশে বিদ্যমান পটভূমি (background) বিকিরণ তা আগেই বলা হয়েছে। ফলে



চিত্র ৫.১৩ : Whole body counter-এর চেয়ারের গঠনাকৃতি।

WBC সচরাচর শিল্ডেড কক্ষে স্থাপন করতে হয় যা অত্যন্ত ব্যয়বহুল বটে। বর্তমান ক্ষেত্রে ব্যয় সংকোচনের জন্য আমরা WBC ডিজাইন ও নির্মাণে প্রচলিত পদ্ধতিতে

আমূল পরিবর্তন আনয়ন করেছি। নতুন এ ব্যবস্থায় shielded কক্ষের পরিবর্তে সন্ধায়ী শিল্ডিংয়ের ব্যবস্থার সাথে (চিত্র ৫.১২) রয়েছে selfshielded অর্ধ চন্দ্রাকার U- আকারের চেয়ার যাতে subject সন্ধায়ীর সম্মুখে হেলানোভাবে শুয়ে থাকতে পারেন। চেয়ারটি (চিত্র ৫.১৩) 0.২৫ মিটার পুরু তেজস্ক্রিয়তামুক্ত ইস্পাতের তৈরি। এ ইস্পাত ১৯৪০ সালের আগে সাগরে নিমজ্জিত জাহাজের ইস্পাত থেকে সংগৃহীত হয়েছিল। উল্লেখ্য যে তখনও পরিবেশে কোনো পারমাণবিক বিস্ফোরণ সংঘটিত হয়নি বলে উক্ত ইস্পাত সম্পূর্ণরূপে কৃত্রিম তেজস্ক্রিয়তামুক্ত বটে। চেয়ারটি একটি চাকাওয়ালা ট্রলিতে স্থাপন করা হয়েছে যাতে সহজেই সুবিধামতো স্থানে নিয়ে স্থাপন করা যায়। লক্ষণীয় যে চেয়ারটি U-আকৃতির হওয়ায় তলদেশ এবং উভয় পার্শ্ব থেকে আগত পটভূমি বিকিরণ শিল্ডেড হচ্ছে; তদুপরি সন্ধায়ী শিল্ডেড হওয়ায় এবং subject এর প্রতি মুখ করে থাকায় পটভূমি বিকিরণ উপর মিচ তলা ও পার্শ্ব কোনো দিক থেকেই সন্ধায়ীতে পৌঁছতে পারছে না বিধায় একটি শিল্ডেড কক্ষের পরিবেশ মিলেছে। চেয়ার ও সন্ধায়ীর সুনির্দিষ্ট alignment-এ subject-detector geometry-তে পটভূমি বিকিরণজনিত গণনা তাৎপর্যপূর্ণ পর্যায়ে হ্রাস পেয়েছে। সন্ধায়ীর শিল্ডিংয়ের ভিতর পাশে (innerside) পাতলা তামার পাত মুড়ে দিয়ে এবং চেয়ারের উপর ১ সে. মি. পুরু সীসার পাত দিয়ে lining করায় বিকিরণের পশ্চাৎ বিক্ষেপণের (back scatter) পরিমাণ হ্রাস পেয়ে সন্ধান সংবেদিত্ব আরো বাড়িয়ে দিয়েছে। উপরিউক্ত বিষয়গুলো নিয়ে একটু চিন্তা করলেই বুঝা যায় যে অতি সহজে ও সস্তায় একটি ব্যবহারোপযোগী চমৎকার WBC নির্মাণ করা গেছে।

এ WBCটি নির্মাণে খরচ হয়েছে অত্যন্ত কম (U. S. Dollar 1500 মাত্র)। এর চালনা পদ্ধতি সহজ সরল এবং রক্ষণাবেক্ষণ খরচ নেই বললেই চলে।

WBC-র বহুবিধ প্রয়োগ প্রচলিত রয়েছে। দেহে বিভিন্ন উপাদানের বিপাকের ধরন ধারণ জানতে ও বুঝতে এরা গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা পালন করতে পারে। বিস্তৃত জায়গা জুড়ে বিরাজমান বস্তু, জীবজন্তু, পাখি ইত্যাদির দেহস্থ তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপনে এদের প্রয়োগ রয়েছে। দেহাভ্যন্তরীণ তেজস্ক্রিয়তা দূষণ নিরূপণ তথা বিকিরণ পাত নিরোধ ও নিয়ন্ত্রণে এদের ভূমিকা গুরুত্বপূর্ণ।

WBC যন্ত্র ব্যবহার করে সকল প্রকার পার্শ্ব প্রতিক্রিয়া এড়িয়ে অধ ঘন্টার মধ্যেই সমুদয় দেহে বিদ্যমান তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপ করা সম্ভব। এর দ্বারা জীব-দেহের বিপাক ক্রিয়ার ধরন-ধারণের জ্ঞান লাভ করা যায়। মলমূত্রাদিতে নির্গত তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপের দ্বারা দেহস্থ তেজস্ক্রিয়তা অনুমান করার পদ্ধতির চেয়ে WBC দ্বারা সরাসরি পরিমাপন অনেক নির্ভরযোগ্য, সহজ ও গ্রহণযোগ্য। এতে

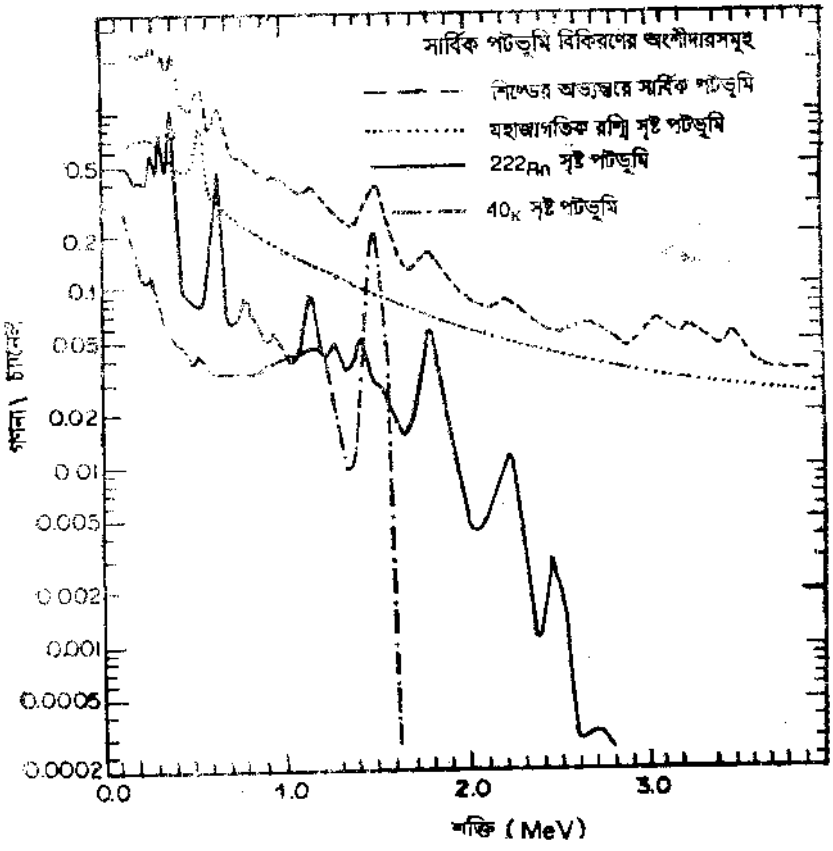
ঝামেলা একদম নেই বললেও অত্যুক্তি হবে না। বিস্তৃত জায়গা জুড়ে বিরাজমান বস্তুর তেজস্ক্রিয়তা নিরূপণে এর সমকক্ষ নেই। জীবন্ত দেহে অঙ্গ প্রত্যঙ্গাদির কার্যপ্রণালী পর্যবেক্ষণে এ যন্ত্রের ভূমিকা অপরিসীম। এর দ্বারা দেহের চর্বি ও পটাশিয়ামের পরিমাণ নির্ণয় করে চিকিৎসা সংক্রান্ত বহু সমস্যার সমাধান দেয়া সম্ভব হয়েছে। চর্বিতে পটাশিয়ামের পরিমাণ মাংসপেশীর তুলনায় কম। তাই ব্যক্তি বিশেষের পটাশিয়ামের পরিমাণ নির্ণয় করে মোটা পাতলা এর পরিমাপ করা গেছে। কারণ ৭০ কিলোগ্রাম ওজনধারী প্রমাণ (Standard) মাপের মানবদেহে ১৪০ গ্রাম পটাশিয়াম থাকার কথা। দেহে পটাশিয়ামের পরিমাণ জানার জন্য প্রচলিত পদ্ধতিতে K-42 ইনজেকশন করে সারা দেহে সমভাবে ছড়িয়ে না পড়া পর্যন্ত অপেক্ষা করতে হয়। তারপর রক্ত নিয়ে Dilution এর মাত্রা পরিমাপ করতে হয়। রোগীর কাছে এটি বড়ই অসহনীয় ও বিরক্তিকর। কিন্তু Whole Body Counter এর সাহায্যে অনায়াসে এ কাজ করা যায়। এটি রাসায়নিক পদ্ধতির চেয়েও উন্নত ও নির্ভরযোগ্য। প্রচলিত পদ্ধতিতে ব্যক্তি বিশেষকে পানিতে ডুবিয়ে অপসৃত পানির পরিমাপ নিয়ে আপেক্ষিক গুরুত্ব (Specific Gravity) নির্ণয়ের মাধ্যমে দেহস্থ চর্বির পরিমাণ নিরূপিত হয়, এটি খুব কষ্টসাধ্য। গবেষণায় ধরা পড়েছে যে মাংসপেশীর রোগ ও কর্মহীনতা পটাশিয়ামের পরিমাণের পার্থক্যের জন্যই ঘটে থাকে। পটাশিয়ামের পরিমাণ অতি মাত্রায় কমে গেলে দুর্বলতা দেখা দেয় আবার পটাশিয়াম গ্রহণের সাথে সাথেই এ দুর্বলতা কেটে যায়। পেশীর অপুষ্টিজনিত গণ্ডগোল, রিকেটস ও যথাযথ বৃদ্ধি না হওয়ার কারণ অনুসন্ধান করতে গিয়েও পটাশিয়াম ঘাটতি এর প্রধান কারণ বলে জানা গেছে। Whole Body Counter এর মাধ্যমে পটাশিয়ামের পরিমাণ জেনে নিয়ে অতি সহজেই এসব সমস্যার সমাধান দেয়া সম্ভব। তাছাড়া চিকিৎসা বিজ্ঞান জগতে দিন দিনই এর নব নব প্রয়োগ উদ্ভাবিত হচ্ছে।

নিয়মিত পরীক্ষার (Check) মাধ্যমে যথাশীঘ্র সম্ভব দেহস্থ তেজস্ক্রিয়তা দূষণের পরিমাণ নিরূপণ তথা প্রতিকারমূলক ব্যবস্থা গ্রহণ করে সমগ্র ক্ষতি এড়ানো সম্ভব। ১৯৫৫ সালে কতিপয় ব্যক্তির নিয়মিত দৈহিক তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপ করার ফলে সর্বপ্রথম তেজস্ক্রিয় সিজিয়াম-১৩৭ এর খাদ্য দূষণের সন্ধান মেলে। পরবর্তী গবেষণায় স্পষ্ট প্রতীয়মান হয় যে খাদ্যবস্তু দূষণের ফলেই খাদ্য-শৃঙ্খলের (Food-chains) মাধ্যমে সিজিয়াম-১৩৭ দেহে ঢুকেছে। মাংস, দুধ, ডিম ও দুগ্ধজাতীয় খাদ্যে এ দূষণ সর্বাধিক ঘটে। পারমাণবিক চুল্লী ও পারমাণবিক প্রতিষ্ঠানে নিয়োজিত কর্মীরা সহজেই তেজস্ক্রিয় দূষণের শিকার হতে পারেন। তাছাড়া নিউট্রন সম্পাতের দরুন নানাবিধ কৃত্রিম তেজস্ক্রিয় আইসোটোপও সৃষ্টি হতে পারে। তাই বিকিরণ কর্মীদের নিয়মিত Whole Body Counter দিয়ে দেহস্থ তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপ করা দরকার।

অত্যাবশ্যকীয় প্রোটিন অণুর সাথে তেজস্ক্রিয় সন্ধানী মিশিয়ে সহজেই দৈহিক শক্তি উৎপাদন ও টিস্যু (Tissue) গঠনে এদের ভূমিকা ও কার্যপদ্ধতি সম্পর্কে সম্যক অবগত হওয়া যায়। রোগীর জন্য Whole Body Counting প্রয়োগ বেশ গ্রহণযোগ্য। এতে কোনো পার্শ্ব প্রতিক্রিয়ার ভয় নেই। এ পদ্ধতিতে Scanning পদ্ধতির চেয়ে কম তেজস্ক্রিয় পদার্থ প্রয়োগ করেও অপেক্ষাকৃত ভাল ফল পাওয়া যায়। ক্যালিফোর্নিয়া বিশ্ববিদ্যালয়ের একদল গবেষক এ যন্ত্রের সাহায্যে গর্ভবতী মায়ের দেহ থেকে গর্ভস্থ সন্তানের দেহে পুষ্টি উপাদান ও অপরাপর অত্যাবশ্যকীয় পদার্থ স্থানান্তরের পরিমাণ নিরূপণ করে প্রয়োজনীয় ব্যবস্থা গ্রহণ করতে পেরেছেন।

৫.৩ পটভূমি বিকিরণ এবং সন্ধায়ী শিল্ডিংয়ের মাধ্যমে এর প্রভাব হ্রাসকরণ (Background Radiation and Detector Shielding to Reduce its Effects)

পৃথিবীর আবহাওয়ামণ্ডলে মহাজাগতিক রশ্মির (cosmic ray) অনবরত বর্ষণে



চিত্র ৫.১৪ : NaI(Ti) সন্ধায়ীর পটভূমি বিকিরণ গণনার নমুনা চিত্র।

সৃষ্ট তেজস্ক্রিয়তা এবং পরিবেশে বিদ্যমান প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয়তার দরুন সব

ধরনের সন্ধায়ীতেই পটভূমি সংকেত (background signal) পাওয়া যায়। পটভূমি বিকিরণজনিত সংকেতের আকার আকৃতি ; সন্ধায়ীর ধরন, আকার আয়তন এবং তাকে ঘিরে স্থাপিত শিল্ডিংয়ের পরিমাণের উপর নির্ভরশীল। পটভূমিজনিত গণনা হার সন্ধায়ী বিশেষে হাজার থেকে প্রতি মিনিটে ১টি পর্যন্ত হতে পারে। যেহেতু পটভূমি গণনা সন্ধায়ী কর্তৃক সর্বনিম্ন কি পরিমাণ তেজস্ক্রিয়তা সন্ধান করা সক্ষম তা'নিরূপণ করে এজন্য অতীব নিম্ন পর্যায়ের তেজস্ক্রিয়তা পরিমাপনের জন্য এটি অতীব গুরুত্ববহ। তাছাড়া শিল্ডিং সন্ধায়ীকে আশেপাশের অপরাপর বহিঃস্থ বিকিরণ উৎস থেকে আলাদা করে রাখে।

পটভূমি বিকিরণের উৎসসমূহকে ৫টি দলে ভাগ করা যায় :

(১) সন্ধায়ীর গাঠনিক বস্তুসমূহে বিদ্যমান প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয়তা,

(২) আনুষঙ্গিক যন্ত্রপাতি, supports ও সন্ধায়ীকে ঘিরে স্থাপিত শিল্ডিংয়ে বিদ্যমান তেজস্ক্রিয়তা,

(৩) পৃথিবীর ত্বক গবেষণাগারের দেয়াল অথবা দূরবর্তী গাঠনিক বস্তুতে বিদ্যমান তেজস্ক্রিয়তা

(৪) সন্নিকটস্থ বায়ুতে বিদ্যমান তেজস্ক্রিয়তা, এবং

(৫) মহাজাগতিক রশ্মির (cosmic ray) প্রাথমিক ও দ্বিতীয় পর্যায়িক (primary and secondary) বিকিরণপাত।

সন্ধায়ীর পটভূমি সংকেতের জন্য দায়ী উপরিউক্ত পটভূমি বিকিরণ উৎসসমূহ হতে উৎসারিত সংকেত ছাড়াও রয়েছে সংযুক্ত সহায়ক ইলেকট্রনিক পদ্ধতি থেকে উদ্ভূত কপট সংকেত (spurious signal)। ৫.১৪ চিত্রে NaI (Tl) সন্ধায়ীর পটভূমি বিকিরণ গণনার নমুনাচিত্র দেখানো হয়েছে।

এক্ষণে সন্ধায়ীর পটভূমি বিকিরণের বিভিন্ন উৎস নিয়ে সংক্ষেপে আলোচনা করা হলো :

(১) সন্ধায়ীর গাঠনিক উপাদান ও সন্ধায়ীকে ঘিরে বিদ্যমান বস্তুস্থ প্রাকৃতিক তেজস্ক্রিয়তা : তেজস্ক্রিয় বিকিরণের উৎস ছড়িয়ে ছিটিয়ে রয়েছে আমাদের চারপাশের পরিবেশস্থ বস্তু নিয়ে তথা মাটি, পানি, পাথর, ভূত্বক, বাতাস, গাছ-বৃক্ষ, তরুলতায় এমন কি জীবদেহেও। সৃষ্টির আদিকাল থেকেই এ সকল তেজস্ক্রিয় উপাদানের অধিকাংশ বিরাজমান রয়েছে। এদের সংখ্যা প্রায় ৫৪টি যাদের অধিকাংশই চারটি তেজস্ক্রিয় ক্ষয় অনুক্রমের (radioactive decay series) সদস্য। তেজস্ক্রিয় ক্ষয় অনুক্রমগুলো হচ্ছে :

(১) ইউরেনিয়াম ক্ষয় অনুক্রম,

(২) থোরিয়াম ক্ষয় অনুক্রম এবং

(৩) অ্যাকটিনিয়াম ক্ষয় অনুক্রম এবং

(৪) নেপচুনিয়াম ক্ষয় অনুক্রম

এদের অনুক্রমিক ক্ষয় উৎপাদগুলো (products) প্রকৃতির সমুদয় উপাদানেই কমবেশি বিদ্যমান রয়েছে। ৭০kg ওজনের প্রমাণ সাইজের (standard size) এক-জন ব্যক্তির দেহে তেজস্ক্রিয় পটাসিয়াম-৪০ (^{40}K) এর পরিমাণ প্রায় ৪,০০০ বেকারেল (Bq)। তেজস্ক্রিয় ক্ষয় অনুক্রম ছাড়া প্রকৃতিতে আরো বেশ কয়েকটি একক তেজস্ক্রিয় উপাদানও রয়েছে যেমন ^{40}K (অর্ধায়ু ১.৩×১০^{৯} বছর), ^{87}Rb (৫×১০^{১০} বছর), ^{147}Sm (১.৩×১০^{১১} বছর), ^{176}Lu (৩×১০^{১০} বছর) ইত্যাদি।

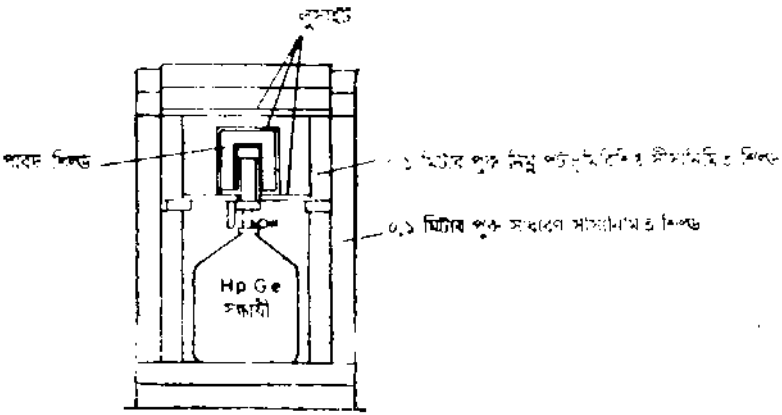
উপরিউক্ত তেজস্ক্রিয় পদার্থগুলির কোনো কোনোটি গ্যাসরূপে বিরাজমান যেমন ^{220}Rn ও ^{222}Rn যথাক্রমে রেডন ও থোরন বাতাসে মিশে রয়েছে। তাই দেখা যায় ঘরের দেয়াল, মেঝে, ছাদ, ইট, কাঠ, পাথর, আসবাবপত্র, ধাতব পদার্থ সব কিছুতেই বিদ্যমান রয়েছে তেজস্ক্রিয় উপাদানসমূহ। এমন কি সন্ধায়ীর গাঠনিক উপাদান, শিল্ডিং ইত্যাদি সব বস্তুতেই বিদ্যমান রয়েছে এ সকল তেজস্ক্রিয় উপাদান। এবার মহাজাগতিক রশ্মি থেকে উদ্ভূত তেজস্ক্রিয়তার বিষয়টি দেখা যাক।

(২) মহাজাগতিক রশ্মি থেকে উদ্ভূত সন্ধায়ীর পটভূমি সংকেত : সৌর জগতের বাইরে কোনো স্থানে সৃষ্ট অতি শক্তিশালী ($১০^{১৭}eV$) মহাজাগতিক রশ্মি পৃথিবীর আবহাওয়ামণ্ডলে অনবরত বর্ষিত হয়ে চলেছে। এতে রয়েছে ভারি পরমাণু-কেন্দ্রীন (nucleus), প্রোটন, ইলেকট্রন, নানাবিধ মেসন কণিকা, ইত্যাদি। এদেরকে বলা হয় প্রাথমিক মহাজাগতিক রশ্মি। এরা পৃথিবীর আবহাওয়ামণ্ডলের সাথে মিথস্ক্রিয়ার নানাবিধ তেজস্ক্রিয় পদার্থ (যেমন ^{3}H, কার্বন-(১৪)(^{14}C) ও অন্যান্য) ও উচ্চ শক্তির বিভিন্ন কণিকা উৎপন্ন করে; একে বলা হয় Cosmic ray shower যা আবার মিথস্ক্রিয়ায় আলফা, প্রোটন, বিটা, নিউট্রন, ইলেকট্রন, মেসন ইত্যাদি তৈরি করে। এদেরকে দ্বিতীয় পর্যায়িক মহাজাগতিক রশ্মিও বলা হয়। এ সকল বিকিরণের অধিকাংশই পৃথিবী পৃষ্ঠ তথা সব ধরনের সন্ধায়ীতে পৌঁছে পটভূমি স্পন্দ (pulse) সৃষ্টি করে।

৫.৪ সন্ধায়ী শিল্ডিং (Shielding the Detector)

নিম্ন পর্যায়ের (low level) তেজস্ক্রিয়তা তথা যে কোনো নমুনায় বিদ্যমান তেজস্ক্রিয়তার সঠিক পরিমাণ পরিমাপনের জন্য সন্ধায়ীর পটভূমি গণনা

পর্যায়ে রাখতে হয়। অরি তার অন্যতম উপায় সন্ধায়ীকে ঘিরে সর্বনিম্ন তেজস্ক্রিয়তাধারী বস্তু দিয়ে তৈরি বেষ্টনী গড়ে তোলা (চিত্র ৫.১৫)। সুদূর প্রবেশ্য বিকিরণ যেমন তড়িৎ চুম্বকীয় বিকিরণ এক্স-রে ইত্যাদি ঠেকাতে হলে প্রয়োজন ভারি উপাদান যথা সীসা (lead), ইস্পাত, পারদ, কংক্রীট ইত্যাদি বস্তুর তৈরি উপযুক্ত পুরুত্বের বেষ্টনী দিয়ে সন্ধায়ীকে শিল্ড করা।

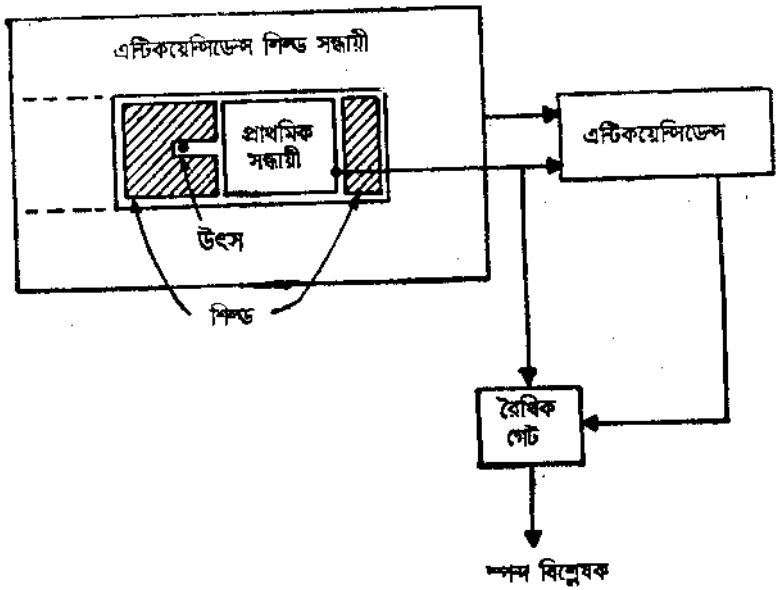


চিত্র ৫.১৫। HpGe সন্ধায়ীকে ঘিরে গড়ে তোলা শিল্ডিং-এর প্রস্থচ্ছেদিক দৃশ্য।

নিউট্রন শিল্ডিংয়ের জন্য কিন্তু ভারি উপাদান মোটেই উপযোগী নয়, নিউট্রন শিল্ডিংয়ের জন্য দরকার হালকাতম উপাদানের শিল্ডিং যেমন হাইড্রোজেনাস (Hydrogenous) বস্তুর বের দেয়া। বিকিরণ শিল্ডিংয়ের যান্ত্রিক উপায় হচ্ছে anti-coincident counting circuit ও coincident counting circuit ব্যবহার করা।

মহাজাগতিক রশ্মি থেকে উদ্ভূত বিকিরণপাত সন্ধায়ী থেকে দূর করতে anti-coincident shield দরকার। এ ব্যবস্থায় প্রাথমিক সন্ধায়ীটিকে দ্বিতীয় অন্য একটি সন্ধায়ী পদ্ধতি দিয়ে ঘিরে রাখা হয়, বাইরের এ সন্ধায়ীর সাথে প্রাথমিক সন্ধায়ীর coincident স্পন্দের (pulse) বাদ দেয়া হয়। যে উৎসের বিকিরণপাত মাপতে হবে তাকে এমনভাবে সন্ধায়ীর সম্মুখে রাখা হয় যেন প্রাথমিক সন্ধায়ীর সাথেই উৎসটি থেকে উৎসারিত সমুদয় বিকিরণের মিথস্ক্রিয়া ঘটতে পারে। Anticoincident সন্ধায়ী একটি annular NaI(Tl) সন্ধায়ী বা বড় আকারের প্লাস্টিক সিন্টিলেটর বা Ring আকারে স্থাপিত কতকগুলো G.M. tubes বা অন্য যে কোনো ধরনের সন্ধায়ী সমবেশে হতে পারে (চিত্র ৫.১৬)।

কোনো রেডিও আইসোটোপ দুটি বিকিরণ একসাথে নির্গত করলে coincidence counting ব্যবস্থায় পটভূমি হ্রাস করা হয়ে থাকে। উদাহরণস্বরূপ বিটা Decay যেখানে তাৎক্ষণিক গামাও উৎসারিত হয়ে থাকে এর কথা বলা যায়। এক্ষেত্রে

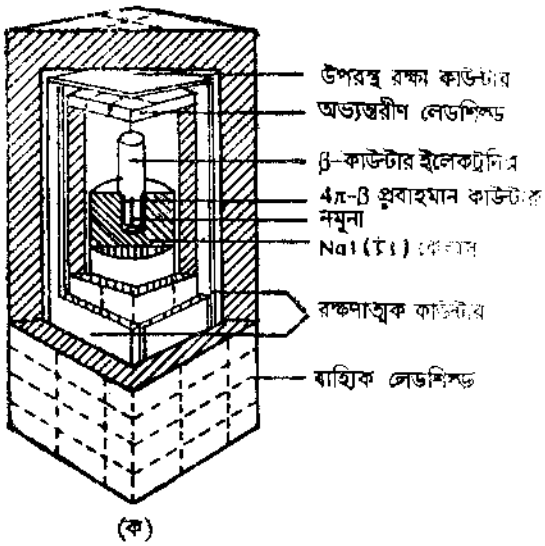


চিত্র ৫.১৬ : পটভূমি বিকিরণজনিত গণনা হ্রাসের জন্য গৃহীত গণনা ব্যবস্থা।

বিটা ও গামা গণনার আলাদা আলাদা ব্যবস্থা করে উভয়ের সাথে সর্বাধিক মিথস্ক্রিয়া ঘটে এমনভাবে উৎসটিকে রেখে সন্ধান কাজ চালানো হয়। উভয় সন্ধায়ীতে মিথস্ক্রিয়াকারী বিকিরণপাত গ্রহণ করে এবং শুধু কোনো এক সন্ধায়ীতে মিথস্ক্রিয়াকারীদের বাদ দিলে পটভূমি বহুলাংশে হ্রাস করা সম্ভব (চিত্র ৫.১৭) হয়।

এ যাবৎ আলোচিত উৎসসমূহ ছাড়া সন্ধায়ীর সাথে সংযুক্ত সহায়ক ইলেকট্রনিক্স পদ্ধতির noisy amplifier, overloaded pulses. voltage breakdown, electromagnetic pick up in the cable ইত্যাদি পটভূমি গণনায় গুরুত্বপূর্ণ অবদান রাখতে পারে। প্রথম থেকেই সযত্নে পরীক্ষা-নিরীক্ষা ও নিখুঁত ডিজাইনের মাধ্যমে এসব পরিহার করা যায় (চিত্র ৫.১৮)।

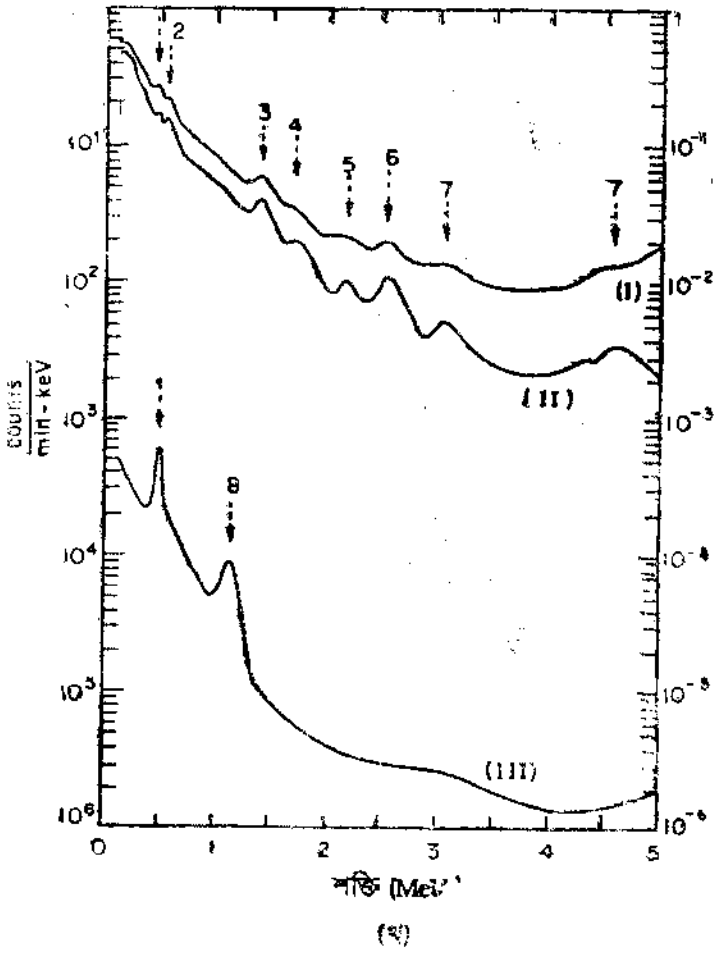
সন্ধায়ীর পটভূমির উপর সবিস্তারে বর্ণনা দিলে একটি আলাদা অধ্যায়ও পর্যাপ্ত নয়; এখানে তেমন সুবিধাও নেই। তাই অতি সংক্ষেপে আলোকপাত করে ব্যবহারকারীদের এ বিষয়ে মনোযোগী করার প্রয়াস পেয়েছি মাত্র।



চিত্র ৫.৭ ; β – γ Coincidence সন্ধায়ীর সমাবেশ ব্যবস্থা যাতে 4π-প্রবাহ সন্ধায়ী β সন্ধান কাজ সম্পন্ন করে এবং NaI(Tl) সন্ধায়ী গামা বিকিরণ সন্ধান করে থাকে।

৫.৫ মধ্যবর্তী প্রমাণ বিকিরণপাত পরিমাপন গবেষণাগার ব্যবহার করে বিকিরণ পরিমাপক যন্ত্র ক্রমাঙ্কন ও প্রমিতকরণ (Calibration and Standardization of Radiation Measuring Instruments using Secondary Standard Dosimetry Laboratory (SSDL))

যথাযথ ও সঠিকভাবে বিকিরণ নিয়ন্ত্রণের জন্য বিকিরণপাতের আসল পরিমাণ নির্ভুলভাবে মাপা প্রয়োজন। বিকিরণপাত জরিপ মিটার (survey meter), এলাকা মনিটর (Area Monitor), বিকিরণপাত ডজিমিটার প্রভৃতি বিকিরণপাত মনিটরিং যন্ত্রসমূহের পারমাণবিক স্থাপনা, বিকিরণ ব্যবহার স্থল এবং আশেপাশের



চিত্র ৫.১৮ : পটভূমি বিকিরণজনিত বর্ণালী, রেখা (1) শিল্ডবিহীন NaI(Tl) সন্ধায়ী দ্বারা গৃহীত রেখা (2) anticoincident শিল্ডিং ব্যবহার করে গৃহীত বর্ণালী রেখা (3) উভয় সন্ধায়ীর মধ্যে $\beta - \gamma$ Coincidence শিল্ডিং ব্যবহার করে গৃহীত বর্ণালী।

বিকিরণপাত মনিটরিংয়ের (monitoring) জন্য ব্যবহৃত হয়ে থাকে। যেহেতু এ সকল যন্ত্রাদি ব্যবহার করে প্রাপ্ত তথ্যাদি বিকিরণ পেশাজীবি, বৃহত্তর জনগোষ্ঠী ও বিকিরণ স্থাপনার নিরাপত্তা নিশ্চিত করার জন্য সরাসরি ব্যবহৃত হয় তাই এদের থেকে গৃহীতব্য পাঠসমূহ (readings) সঠিক ও যথাযথ হওয়া আবশ্যকীয়। এতদুদ্দেশ্যে তেজস্ক্রিয়তা ও বিকিরণপাত পরিমাপক যন্ত্রসমূহকে ব্যবহারস্থলের

অনুরূপ যথাযথ বিকিরণস্থলে স্থাপন করে ক্রমাঙ্কন ও প্রমিতকরণ করা প্রয়োজন। তার সাথে আরো দরকার নিয়মিত রক্ষণাবেক্ষণ ব্যবস্থা। তাই এ সকল যন্ত্রপাতি সংগ্রহের সাথে সাথেই এদের মধ্যে কোনো গাঠনিক বা যান্ত্রিক ত্রুটিবিচ্যুতি এবং বৈদ্যুতিক বৈশিষ্ট্য তথা ত্রুটি পরখ করে নিতে হয়; তদুপরি পারিপার্শ্বিক ও পরিবেশ-গত যে যে প্রভাবে অকার্যকর হয়ে পড়তে পারে সেসব সম্বন্ধে লক্ষ্য করতে হবে। অতঃপর ক্রমাঙ্কনের কাজটি সম্পাদন করতে হবে। ক্রমাঙ্কন ও পরিমিতকরণের উদ্দেশ্যাবলী হচ্ছে :

(১) যে সকল শক্তির বিকিরণপাত মাপা হবে তাদের বিভিন্ন রেঞ্জে এর সাড়ার (response) বৈশিষ্ট্য নিরূপণ অর্থাৎ বিকিরণের শক্তি যাই হোক না কেন যন্ত্রটি সঠিকভাবে নির্ভরযোগ্যতার সাথে তা' পরিমাপনে সক্ষম হবে ;

(২) পরিবেশের চরম পরিস্থিতিতে যন্ত্রটির কার্য সম্পাদন (performance) বৈশিষ্ট্য সম্পর্কে অবগত হওয়া ; এবং

(৩) নির্ভরযোগ্যতা ও সঠিক কার্যকারিতা নিশ্চিতকরণ।

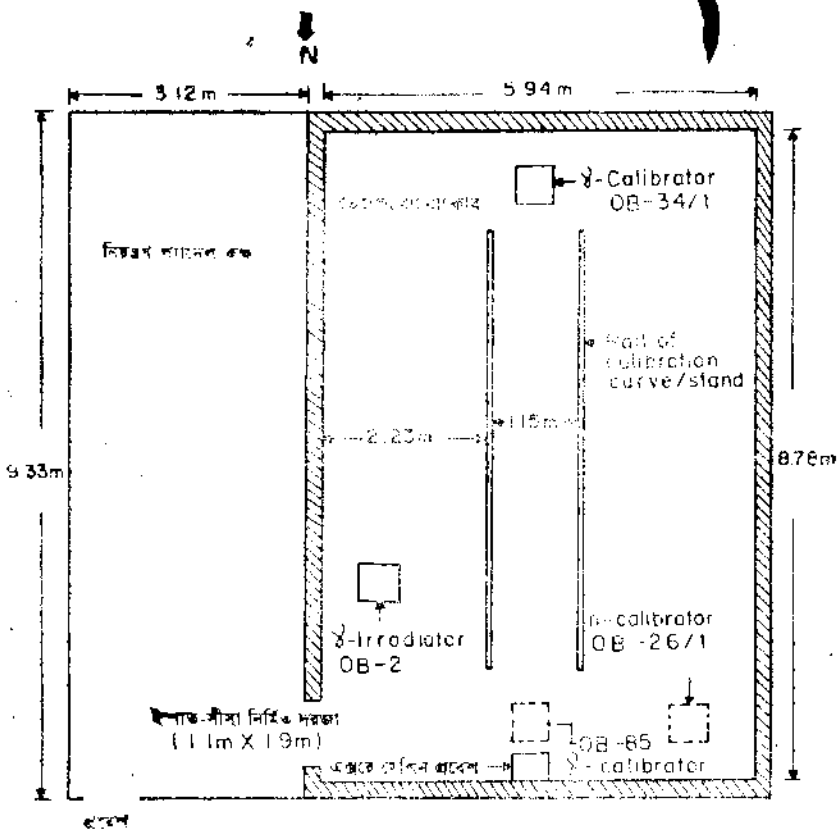
তাই দেখা যাক ক্রমাঙ্কন ও প্রমিতকরণের জন্য কি কি আবশ্যকীয়। এত-দুদ্দেশ্যে প্রথমেই দরকার প্রমাণ বিকিরণ-উৎস সংবলিত একটি স্থাপনা (a facility equipped with standard radiation sources and ancilliaries) সজ্জা যাতে থাকবে গামা-রশ্মি বিকিরণপাতকরণ যন্ত্র, এক্স-রে মেশিন ও নিউট্রনসহ অন্যান্য প্রমাণ বিকিরণ উৎস যার সাহায্যে বিকিরণপাত পরিমাপকারী যন্ত্রসমূহকে বাস্তবে field condition-এ বিকিরণপাতগ্রস্ত করা যাবে। এ কাজ সম্পাদনের জন্য দুধরনের স্থাপনা প্রচলিত রয়েছে :

(ক) মৌলিক আদর্শমানের বিকিরণপাত পরিমাপন স্থাপনা (Primary Standard Dosimetry Laboratory সংক্ষেপে PSDL) : সরাসরি বিকিরণপাত পরিমাপনে সক্ষম পরম আদর্শ বিকিরণপাত পরিমাপক কৌশল (absolute exposure monitoring devices), যথা মুক্ত বায়ু আয়নায়ন প্রকোষ্ঠ (Free air ionization chamber), ক্যালরিমিটার (calorimeter), Extrapolation chamber প্রভৃতি যন্ত্রপাতি সমবায়ে সজ্জিত স্থাপনা যা সচরাচর PSDL নামে পরিচিত। এর স্থাপনা ও রক্ষণাবেক্ষণে দক্ষ জনবল ও প্রশিক্ষণ প্রাপ্ত পর্যাপ্ত জনশক্তি দরকার হয়; তদুপরি স্থাপন ও রক্ষণাবেক্ষণ বড়ই ব্যয়বহুল। তাই সকল দেশের পক্ষে PSDL স্থাপন সম্ভব নয়। বিশ্ব জুড়ে কেবল হাতে গোনা ২০টি মাত্র দেশে PSDL স্থাপন করা হয়েছে। অথচ physical measurement সমূহের Unification ও dose inter comparson-এ এবং এক দেশে নিরূপিত ও প্রাপ্ত তথ্য সমপরিবেশও আবহা-

ওয়ার সঠিকটির দেশে প্রয়োগ করার জন্য PSDL প্রয়োজন। তাই সূক্ষ্ম যন্ত্রপাতি ও সুবিধাদি সংবলিত PSDL-গুলোকে আঞ্চলিক Reference Centre of Dosimetry (RCD) রূপে ব্যবহার করে মধ্যবর্তী প্রমাণ ডোজ পরিমাপন গবেষণাগার (Secondary Standard Dosimetry Laboratory) (SSDL) দেশে দেশে প্রতিষ্ঠিত হয়েছে। বিশ্বের ৭০টির ও অধিক দেশে এ যাবৎ এ ধরনের স্থাপনা প্রতিষ্ঠিত হয়েছে। PSDL থেকে ক্রমাঙ্কিত ও প্রমিতকৃত যন্ত্রপাতির সাথে আঞ্চলিকভাবে স্থাপিত SSDL সমূহে স্থাপন করে আঞ্চলিক পরিবেশ তথা তাপমাত্রা, বায়ুচাপ, আর্দ্রতা ইত্যাদির পরিপ্রেক্ষিতে সংশোধন, ক্রমাঙ্কন ও প্রমিতকরণ করে স্থাপন করা হয় এবং সেখান থেকে দৈনন্দিন মাঠ কর্মে (Field work) ব্যবহৃত যন্ত্রাদি বাস্তবে মাঠ কর্মে সম্মুখীন হতে হয় এমন সব সম্ভাব্য অবস্থায় স্থাপন করে নিয়মিত ক্রমাঙ্কন ও প্রমিতকরণ করে নেয়া হয়। SSDL স্থাপন করে স্বল্প ব্যয়ে পৃথিবী জুড়ে Physical measurement সমূহে unification তথা অন্তঃতুলনা (intercomparison) সম্ভব হওয়ার সাথে সাথে পরিমাপনে সঠিকতা (accuracy) ও প্রমিতকরণ (Standardization) অর্জন করা সম্ভব হয়েছে।

উল্লেখ্য যে, যে কোনো বিকিরণপাত পরিমাপক যন্ত্রের সাড়ায় (response) নিজস্ব আকার আকৃতি, বিকিরণের শক্তি, আপতন কোণ ও দিক, আপতনস্থল, বিকিরণের বিক্ষেপণের বৈশিষ্ট্য ইত্যাদির উপর প্রায় সর্বাংশে নির্ভরশীল। তাই ক্রমাঙ্কনের বিবরণ সংবলিত প্রতিবেদনে ক্রমাঙ্কনকালে বিরাজমান পরিস্থিতি ও পরিবেশের বিবরণও থাকা আবশ্যকীয়। এ যাবৎ পরিচালিত আলোচনায় স্পষ্টই বুঝা যায় যে বিকিরণপাত সন্ধানী থেকে নির্ভুল, যথাযথ ও আস্থাযোগ্য তথ্য পেতে হলে বিশেষভাবে পরিকল্পিত ও দক্ষ যন্ত্রপাতি সজ্জিত সুবিধাজনক গবেষণাগারে ক্রমাঙ্কিত ও প্রমিত করে নিতে হবে। বাংলাদেশে এতদুদ্দেশ্যে পরমাণু শক্তি কমিশনের সাভারস্থ পরমাণু গবেষণা প্রতিষ্ঠানের বিকিরণ নিয়ন্ত্রণ ও তেজস্ক্রিয় বর্জ্য ব্যবস্থাপনা বিভাগের গবেষণাগারে SSDL স্থাপন করা হয়েছে। এ গবেষণাগারের দায়িত্বে ছিলেন অত্র গ্রন্থ প্রণেতা (১৯৯৩ থেকে মার্চ ১৯৯৭ পর্যন্ত)। উক্ত গবেষণাগারে স্থাপিত হয়েছে দূর নিয়ন্ত্রণসহ (Remote control) Visual display monitor সজ্জিত নিয়ন্ত্রণ কক্ষ সংলগ্ন ভারি শিল্ডের (shield) দরজাসহ বিকিরণপাতপ্রস্তুকরণ উপকরণ যেমন mounting rail যাতে বিশেষ ধারক (holder) রয়েছে ও collimation এর জন্য LASER বীম (beam) সংবলিত বিকিরণপাতপ্রস্তুকরণ বাংকার যাতে স্থাপিত হয়েছে বিভিন্ন শক্তির প্রমাণ গামা বিকিরণ

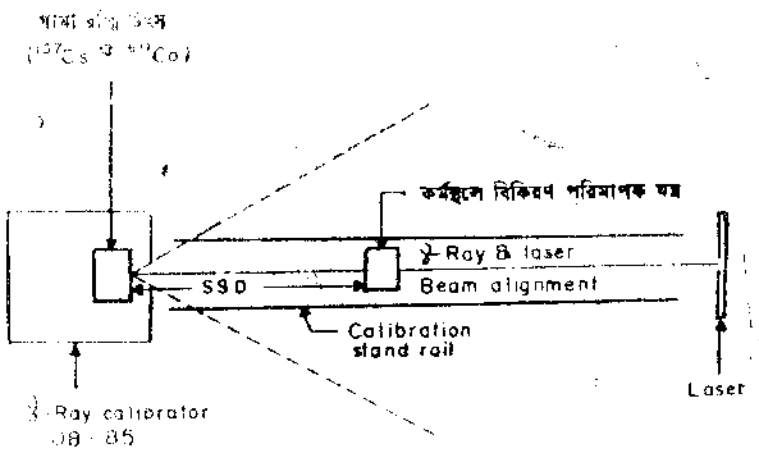
উৎস, সুপারফিসিয়াল (superficial) এক্স-রে মেশিন ও নিউট্রন উৎস যেগুলি যুক্তরাজ্যের (U.K.) National Physical Primary Standard Laboratory (NPPSDL)-তে স্থাপিত সংশ্লিষ্ট যন্ত্রপাতি দ্বারা ক্রমাঙ্কন ও প্রমিতকরণ করে সরবরাহ করা হয়েছে সার্টিফিকেট ও ব্যবহারবিধি সহকারে (চিত্র ৫.১৯)। চিত্রে



চিত্র ৫.১৯ : SSDL-এর বিকিরণশালাস্থ বাংকারের নকশা।

বাংকারে স্থাপিত ক্রমাঙ্কনকারী বিকিরণ উৎস OB – 85 (^{137}Cs,^{60}Co), OB – 34/1 (^{137}Cs, ^{60}Co), OB – 2(^{60}Co), OB – 26/1 ($^{241}Am/Be$), এক্স-রে মেশিন, রেল (rail) ইত্যাদি দেখানো হয়েছে ; আরো লক্ষণীয় যে বাংকারটি ভারি উপাদানের তৈরি ইট দ্বারা shielded বটে। উল্লেখ্য NPPSDL থেকে প্রাপ্ত এ সমুদয় উৎস ও যন্ত্রপাতি প্রাথমিক পরীক্ষা-নিরীক্ষার পর স্থাপন করে

ক্রমাঙ্কিত ও প্রমিত করা হয়েছে এবং সমগ্র দেশব্যাপী সেবাদানের জন্য SSDL রূপে ব্যবহৃত হচ্ছে। এর সাহায্যে সার্ভেমিটার, পকেট ডজিমিটার, এলাকা মনিটর, ব্যক্তিক বিকিরণপাত মনিটর তথা ফিল্ম ব্যাজ ডজিমিটার, TLD ইত্যাদি ক্রমাঙ্কন ও প্রমিতকরণ করা হচ্ছে। এ সব কাজে ব্যবহৃত বিকিরণপাতকারী যন্ত্রাদি আলাদা দূরে নিয়ন্ত্রণ কক্ষ থেকে স্বয়ংক্রিয়ভাবে পরিচালনা করা হয়ে থাকে। (৫.২০) চিত্রে বিকিরণপাত প্রস্তুতকরণ পদ্ধতি প্রদর্শিত হলো।



চিত্র ৫.২০ : ক্রমাঙ্কন ও প্রমিতকরণ সজ্জা ও পদ্ধতি।

Dhaka

পাপু
৪