



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مخابرات - موج

طراحی و شبیه سازی تقویت کننده ی کلایسترون توان بالای باند L

استاد راهنما :

دکتر محمد صادق ابریشمیان

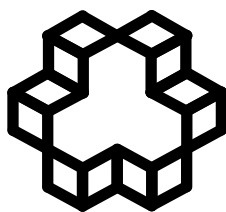
دانشجو:

سید مجتبی محمدی

تیرماه ۱۳۹۲

الحمد لله
الرحمن الرحيم

تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

تأییدیه هیات داوران

هیأت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده با عنوان:

طراحی و شبیه‌سازی تقویت‌کننده‌ی کلایسترون توان بالای باند L

توسط آقای سید مجتبی محمدی، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی

ارشد رشته مهندسی برق گرایش مخابرات-موج در تاریخ ۱۳۹۲/۴/۵ مورد تأیید قرار می‌دهند.

امضاء

۱- استاد راهنما: دکتر محمد صادق ابریشمیان

امضاء

۲- ممتحن داخلی: دکتر رمضانعلی صادق زاده

امضاء

۳- ممتحن خارجی: دکتر نادر قدیمی

امضاء

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده:

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه: طراحی و شبیه‌سازی تقویت‌کننده‌ی کلایسترون توان بالای باند L

استاد راهنما: آقای دکتر محمد صادق ابریشمیان

نام دانشجو: سید مجتبی محمدی

شماره دانشجوئی: ۹۰۰۷۷۰۴

اینجانب سید مجتبی محمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش مخابرات موج دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید است، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن است. هرگونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز است.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

باسپاس از:

استاد گرانقدر، جناب آقای دکتر محمد صادق ابریشمیان که در اخذ و انجام این پروژه، مرا مورد حمایت خود قرار دادند. همچنین از مدیریت محترم و کارکنان گروه لامپ صنایع الکترونیک شیراز، نهایت سپاس را دارم. جا دارد از آقای دکتر عماد حمیدی و مهندس محمدرضا وهمیان که با همفکری خود، مرا در انجام این پروژه یاری دادند، تشکر کنم.

چکیده

با توجه به نیاز صنایع هوافضا و دفاعی به لامپ تقویت کننده‌ی کلایسترون، این پایان‌نامه در راستای کسب دانش طراحی یک نمونه از این تقویت کننده‌ها هدف گذاری شده و لامپ کلایسترونی با پهنای باند ۵٪ در باند L ، توان خروجی حداقل ۱/۲ مگاوات به صورت پالسی و بهره‌ی ۴۵ دسی بل در بازه‌ی فرکانسی، قدم به قدم طراحی و شبیه سازی شده است. در این پروژه سعی شده تا لامپ بدون استفاده از محفظه‌های تزویج شده و یا گروه محفظه‌ای^۱ و تنها با ۷ محفظه‌ی تشدید به پهنای باند و توان خواسته شده برسد. از آن جایی که کسب اطمینان از دقت نرم افزارهای شبیه سازی امری ضروری است، قبل از شروع طراحی، یک نمونه لامپ کلایسترون صنعتی شبیه سازی، بهینه سازی و ساخته شده و نتایج تست عملی با نتایج شبیه سازی مقایسه شده است. مطابقت خوب نتایج تاییدی بر روند صحیح شبیه سازی و صحت نرم افزارهای مورد استفاده است.

روند طراحی و شبیه سازی در طی پروژه منتهج به طرحی با توان خروجی بیش از ۱/۶ مگاوات، پهنای باند ۷٪، راندمان ۴۶٪ و همچنین بهره‌ی ۴۷ دسی بل در بازه‌ی فرکانسی شده است.

کلید واژه: لامپ مایکروویو، کلایسترون، محفظه‌های تشدید، *AJdisk*

¹ Cluster cavity

فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه	۱
۱-۱- تاریخچه	۱
۲-۱- آشنایی با لامپ‌های میکروویو	۸
۱-۲-۱- انواع لامپ‌های کلاسیک میکروویو	۸
۲-۲-۱- بررسی وضعیت تولید کننده‌های توان میکروویوی و مقایسه‌ی آنها	۱۲
۳-۱- هدف پروژه	۱۴
فصل ۲- لامپ‌های کلاسترون	۱۵
۱-۲- مقدمه	۱۵
۲-۲- نحوه‌ی عملکرد	۱۵
۳-۲- انواع لامپ‌های کلاسترون	۱۸
۱-۳-۲- کلاسترون‌های چند محفظه‌ای	۱۸
۲-۳-۲- کلاسترون‌های چند پرتوی	۲۱
۳-۳-۲- کلاسترون بازگشتی	۲۴
۴-۳-۲- کلاسترون‌های گروه محفظه‌ای	۲۵
۴-۲- روش‌های تنظیم فرکانس محفظه‌ها	۲۷
۱-۴-۲- قسمت درایور	۳۰
۲-۴-۲- قسمت خروجی	۳۴
۳-۴-۲- کلاسترون‌های پربازده	۳۷
۴-۴-۲- کلاسترون‌های پهن باند	۴۲

فصل ۳- طراحی اجزا و شبیه سازی.....	۴۴
۱-۳- مقدمه.....	۴۴
۲-۳- کدهای شبیه سازی.....	۴۵
۱-۲-۳- <i>ID Disk</i>	۴۵
۲-۲-۳- <i>Particle In Cell (PIC)</i>	۴۷
۳-۳- بررسی دقت نرم افزارهای شبیه سازی.....	۵۹
۱-۳-۳- نرم افزار <i>AJdisk</i>	۵۹
۲-۳-۳- نرم افزار <i>CST</i>	۶۳
۴-۳- طراحی اولیه‌ی لامپ کلاسترون.....	۶۴
۵-۳- طراحی محفظه‌های تشدید.....	۶۷
۶-۳- طراحی کوپلینگ ورودی.....	۷۰
۷-۳- طراحی کوپلینگ خروجی.....	۷۱
۸-۳- طراحی کلکتور.....	۷۴
۹-۳- شبیه سازی سه بعدی لامپ کلاسترون.....	۷۷
۱-۹-۳- تعیین میدان متمرکز کننده.....	۷۸
۲-۹-۳- تنظیم ضریب کیفیت (Q_0).....	۷۹
۳-۹-۳- تعیین زمان صعود <i>RF</i> ورودی و جریان پرتو.....	۷۹
فصل ۴- نتایج طراحی و پیشنهادات.....	۸۳
مراجع.....	۸۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: تصویر پروفسور روژانسکی ۲
- شکل ۲-۱: تیوب هیل ۳
- شکل ۳-۱: تشدیدگر هنسین ۴
- شکل ۴-۱: راسل و سیگرد واریان ۴
- شکل ۵-۱: کلايسترون مدل A ۵
- شکل ۶-۱: آزمایش فرود کور ۶
- شکل ۷-۱: چودورو در حال مقایسه‌ی کلايسترونی ۱۵۰ کیلوواتی با کلايسترون ۳۰ مگاواتی ۶
- شکل ۸-۱: هنسین در کنار قسمتی از شتاب دهنده‌ی ذرات استنفورد ساخت خودش ۷
- شکل ۹-۱: نمودار پیشرفت کلايسترون ۸
- شکل ۱۰-۱: انواع لامپ‌های کلاسیک میکروویو ۹
- شکل ۱۱-۱: برهم کنش در لامپ‌های باریکه خطی ۹
- شکل ۱۲-۱: انواع لامپ‌های خطی ۱۰
- شکل ۱۳-۱: برهم کنش در لامپ‌های باریکه میدان متقاطع ۱۰
- شکل ۱۴-۱: انواع لامپ‌های میدان متقاطع ۱۱
- شکل ۱۵-۱: انواع لامپ‌های موج سریع ۱۱
- شکل ۱۶-۱: مقایسه قطعات حالت جامد و لامپ‌های میکروویو ۱۲
- شکل ۱۷-۱: مقایسه‌ی لامپ‌های ماکروویو با یکدیگر ۱۳
- شکل ۱-۲: کلايسترون دو محفظه‌ای ۱۶
- شکل ۲-۲: مدولاسیون سرعت (شکل اپلیگیت) ۱۶
- شکل ۳-۲: نمایی از برهم کنش درون لامپ ۱۷

- شکل ۲-۴: انواع کلایسترون‌ها ۱۸
- شکل ۲-۵: کلایسترون چند محفظه‌ای ۱۹
- شکل ۲-۶: فواصل محفظه‌های محاسبه شده‌ی یک کلایسترون چند محفظه‌ای ۱۹
- شکل ۲-۷: بهره‌ی مجموع و بهره‌ی هر محفظه به تنهایی ۲۰
- شکل ۲-۸: کلایسترون چند محفظه‌ای ساخت اسلک ۲۱
- شکل ۲-۹: پیکربندی یک کلایسترون ۴ پرتوی ۲۲
- شکل ۲-۱۰: ساختار یک کلایسترون چند پرتوی ۲۳
- شکل ۲-۱۱: کلایسترون دو پرتوی ساخت *CPI* ۲۳
- شکل ۲-۱۲: کلایسترون بازگشتی ۲۴
- شکل ۲-۱۳: دسته بندی در کلایسترون بازگشتی ۲۵
- شکل ۲-۱۴: کلایسترون بازگشتی ساخت رایتون ۲۵
- شکل ۲-۱۵: ساختار یک کلایسترون گروه محفظه‌ای ۲۶
- شکل ۲-۱۶: انواع محفظه‌های موجود برای کلایسترون‌های گروه محفظه‌ای ۲۶
- شکل ۲-۱۷: کلایسترون گروه محفظه‌ای اسلک ۲۷
- شکل ۲-۱۸: مشخصه‌ی تنظیم محفظه‌ی یکی مانده به آخر ۲۸
- شکل ۲-۱۹: چیدمان فرکانسی محفظه‌ها در تنظیم پهن باند ۲۸
- شکل ۲-۲۰: توان خروجی تابعی از فرکانس برای یک کلایسترون پربازده ۲۹
- شکل ۲-۲۱: مشخصه‌ی خروجی کلایسترون با تنظیم پهن باند ۲۹
- شکل ۲-۲۲: مشخصه‌های انتقالی برای یک کلایسترون ۳۰
- شکل ۲-۲۳: بهره یک محفظه به صورت تابعی از طولهای مختلف لوله‌ی دریافت ۳۱
- شکل ۲-۲۴: منحنی بهره هر محفظه در تنظیم پهن باند ۳۱

- شکل ۲-۲۵: فواصل محفظه‌های ارائه شده توسط متیویر ۳۲
- شکل ۲-۲۶: بهره سیگنال کوچک کلایسترون ۸ محفظه‌ای با فاصله‌های متیویر ۳۲
- شکل ۲-۲۷: فرکانس‌های تنظیم کلایسترون فریدلندر ۳۳
- شکل ۲-۲۸: فواصل نسبی محفظه‌های کلایسترون فریدلندر ۳۳
- شکل ۲-۲۹: خروجی توان کلایسترون طول دریافت باریک شونده برای یک سامانه راداری ۳۴
- شکل ۲-۳۰: مشخصات امپدانس برخی از قسمتهای خروجی ۳۴
- شکل ۲-۳۱: محفظه دوگانه تنظیم شده ۳۵
- شکل ۲-۳۲: مدار معادل محفظه دوگانه تنظیم شده ۳۵
- شکل ۲-۳۳: امپدانس بین محفظه‌ها تابعی از فرکانس ۳۶
- شکل ۲-۳۴: مقایسه‌ای بین مشخصات امپدانس ۳ نوع قسمت خروجی گفته شده ۳۶
- شکل ۲-۳۵: محاسبات بازده تابعی از ضریب پرویانس توسط آلبرز و کوسمال ۳۷
- شکل ۲-۳۶: بازده‌های محاسبه شده برای دو طراحی میجرن و لین ۳۸
- شکل ۲-۳۷: بهبود بازده با استفاده از جمع‌کننده‌های فشرده چند طبقه ۳۹
- شکل ۲-۳۸: برخی از ساختارهای ساخته شده با استفاده از هارمونیک دوم دسته‌بندی ۴۰
- شکل ۲-۳۹: فاز الکترون برای حالت هارمونیک دوم قبل از دسته بندی ۴۰
- شکل ۲-۴۰: جریان پرتو تابعی از فاصله‌ی نرمالیزه شده ۴۱
- شکل ۲-۴۱: منحنی توان خروجی تابعی از ولتاژ پرتو برای کلایسترون *X-3074B* ۴۱
- شکل ۲-۴۲: توان و بازده برای کلایسترون *VKS-7773* ۴۲
- شکل ۲-۴۳: بازده تابعی از فرکانس در لامپ *VA-8I25C* ۴۳
- شکل ۳-۱: تقسیم پرتو الکترون به دیسک‌های باردار ۴۵
- شکل ۳-۲: الگوریتم شبیه سازی کد *ID Disk* را در نرم افزار *AJdisk* ۴۶

- شکل ۳-۳: فلوجارت الگوریتم PIC ۴۷
- شکل ۴-۳: محاسبه‌ی مسیر ذرات با توجه به مقادیر مختلف ΩDT ۵۱
- شکل ۵-۳: فلوجارت کوپلینگ الگوریتم $FDTD$ به الگوریتم PIC ۵۲
- شکل ۶-۳: ترتیب زمانی حل معادلات مرتبط با مکان، سرعت و چگالی جریان ۵۳
- شکل ۷-۳: شکل ذرات در هر روش و بار نسبت داده شده به هر نقطه در فضای یک بعدی ۵۵
- شکل ۸-۳: تابع W برای سه روش تعیین بار ۵۶
- شکل ۹-۳: تعیین بار به روش CIC در دو بعد ۵۶
- شکل ۱۰-۳: تعیین چگالی جریان با توجه به طول مسیر حرکت ذره ۵۷
- شکل ۱۱-۳: ساختار دوبعدی کلایسترون B -Factory ۶۰
- شکل ۱۲-۳: شمای کلی لامپ کلایسترون B -Factory ۶۰
- شکل ۱۳-۳: پارامترهای ورودی در نرم‌افزار $AJdisk$ ۶۱
- شکل ۱۴-۳: نتیجه اجرای برنامه ۶۱
- شکل ۱۵-۳: بهره لامپ کلایسترون B -Factory تابعی از فرکانس ۶۲
- شکل ۱۶-۳: مقایسه بهره‌ی بدست آمده توسط چند نرم افزار با مقدار واقعی آن ۶۲
- شکل ۱۷-۳: مقایسه بهره در شبیه سازی و اندازه‌گیری عملی لامپ عملیاتی ۶۳
- شکل ۱۸-۳: نمودار بهره نسبت به فرکانس در لامپ طراحی شده با نرم افزار $AJdisk$ ۶۵
- شکل ۱۹-۳: نمودار توان خروجی لامپ طراحی شده نسبت به توان ورودی ۶۵
- شکل ۲۰-۳: نمودار فاز دیسک‌های الکترون بر حسب فاصله از مبدا در لامپ طراحی شده ۶۶
- شکل ۲۱-۳: نمودار تغییرات سرعت نسبی دیسک‌ها نسبت به مکان در لامپ طراحی شده ۶۶
- شکل ۲۲-۳: نمودار I_{rf}/I_o در لامپ طراحی شده با توان ورودی $15W$ ۶۷
- شکل ۲۳-۳: ساختار محفظه‌ی چهارم در لامپ طراحی شده ۷۰

- شکل ۳-۲۴: نحوه‌ی کوپلینگ کابل کوآکسیال به محفظه‌ی تشدید ۷۰
- شکل ۳-۲۵: ساختار کوپلینگ ورودی در لامپ طراحی شده ۷۱
- شکل ۳-۲۶: دو نوع متداول اتصال موجبر به محفظه‌ی تشدید ۷۱
- شکل ۳-۲۷: فضای داخل (خلاء) محفظه و موجبر طراحی شده ۷۲
- شکل ۳-۲۸: ساختار پنجره در قسمت خروجی لامپ کلاسترون ۷۲
- شکل ۳-۲۹: ساختار موجبر و پنجره در قسمت خروجی لامپ کلاسترون ۷۳
- شکل ۳-۳۰: نمودار S -Parameters برای شکل ۳-۲۹ ۷۳
- شکل ۳-۳۱: ساختار قسمت خروجی در لامپ کلاسترون طراحی شده ۷۴
- شکل ۳-۳۲: نحوه‌ی برخورد پرتو با جریان ثابت به کلکتور ۷۵
- شکل ۳-۳۳: نحوه‌ی برخورد پرتو با جریان مدوله شده به کلکتور ۷۵
- شکل ۳-۳۴: نمودار تغییرات توان پرتوی برخورد کرده با سطح در یک کلکتور بهینه نشده ۷۶
- شکل ۳-۳۵: نمودار تغییرات توان پرتوی برخورد کرده با سطح در کلکتور طراحی شده ۷۶
- شکل ۳-۳۶: ساختار کلکتور طراحی شده ۷۶
- شکل ۳-۳۷: ساختار سه بعدی و دو بعدی لامپ طراحی شده ۷۷
- شکل ۳-۳۸: حجم‌های قرار داده شده در محفظه‌های لامپ طراحی شده برای تنظیم Q_0 ۷۹
- شکل ۳-۳۹: نويز ايجاد شده در توان خروجی حاصل از عدم وجود زمان صعود جریان پرتو ۸۰
- شکل ۳-۴۰: ولتاژ در پورت خروجی در فرکانسهای (۱) $0.97F_0$ (۲) F_0 (۳) $1.02F_0$ ۸۱
- شکل ۳-۴۱: ولتاژ در پورت ورودی لامپ طراحی شده ۸۱
- شکل ۳-۴۲: نمودار تغییرات سرعت الکترون‌ها بر حسب فاصله‌ی مکانی در فرکانس F_0 ۸۲
- شکل ۳-۴۳: نحوه‌ی دسته بندی الکترون نزدیکی کلکتور و محفظه‌ی خروجی ۸۲
- شکل ۴-۱: مقایسه بهره‌ی شبیه سازی و اندازه‌گیری عملی در یک لامپ عملیاتی ۸۳

شکل ۲-۴: نمودار بهره نسبت به فرکانس در لامپ طراحی شده با نرم افزار *AJdisk* ۸۴

شکل ۳-۴: نمودار بهره نسبت به فرکانس در لامپ شبیه سازی شده با *CST* ۸۴

شکل ۴-۴: ولتاژ در پورت خروجی لامپ طراحی شده در فرکانس F_o ۸۵

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱: مقایسه تخصصی لامپ‌های میکروویو با یکدیگر ۱۳

جدول ۱-۲: مشخصه‌های عملیاتی کلاسترون VA-8125C ۴۳

جدول ۱-۳: مشخصات لامپ کلاسترون هدف‌گذاری شده ۴۴

جدول ۲-۳: مشخصات محفظه‌های لامپ طراحی شده با AJdisk ۶۷

جدول ۳-۳: مقادیر R/Q و $M Factor$ بهینه پس از طراحی محفظه‌ها ۶۹

جدول ۱-۴: مشخصات لامپ کلاسترون طراحی شده ۸۵

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- تاریخچه

نخستین لامپ‌ها، لامپ‌های سه قطبی^۱، در سال ۱۹۰۶ میلادی توسط دی فارست^۲ اختراع شدند ولی تا سال ۱۹۱۲ همچنان ارتباطات با کدهای مورس انجام می‌شد و استفاده از لامپ‌ها هنوز آغاز نگردیده بود. در جنگ جهانی اول نیز ارتباطات بیسیم وجود داشت اما فرستنده‌ای که بتواند از این نوع ارتباطات پشتیبانی کند چند سال بعد، یعنی در سال ۱۹۱۸ توسط آرمسترانگ^۳ اختراع گردید. آرمسترانگ فرستنده‌های بسیار معروف سوپرهتروداین را ابداع کرد [۱].

با گذر زمان و بوجود آمدن پیشرفت‌هایی در زمینه‌های مخابراتی، محدودیت توانی و فرکانسی لامپ‌های سه قطبی و چهارقطبی^۴ احساس گردید و این نیاز، جستجو را برای یافتن منابع جدید امواج رادیویی^۵ آغاز نمود. در دهه‌ی ۱۹۳۰ گروه‌های مختلفی برای این مهم در تلاش بودند تا اینکه در سال ۱۹۳۵ پرفسور روزانسکی^۶ توانست مدولاسیون سرعت^۷ را کشف کند. روزانسکی پرفسور فیزیک در موسسه پلی تکنیک لنینگراد^۸ مشغول به کار بود. او در سال ۱۹۳۲ توانست روشی برای تولید پرتوهای الکترونی با چگالی‌های متفاوت بیان کند. تا جایی که منابع گفته اند، روزانسکی نه تئوری خود را منتشر کرد و نه آن را مورد آزمایش قرار داد. به هر حال، او کار خود را با فیزیکدان جوان بسیار باهوش موسسه خود، اگنسا ارسنوا^۹ ادامه داد. شکل ۱-۱ تصویر پرفسور روزانسکی را نشان می‌دهد.

¹ Triodes

² DeForest

³ Armstrong

⁴ Tetrodes

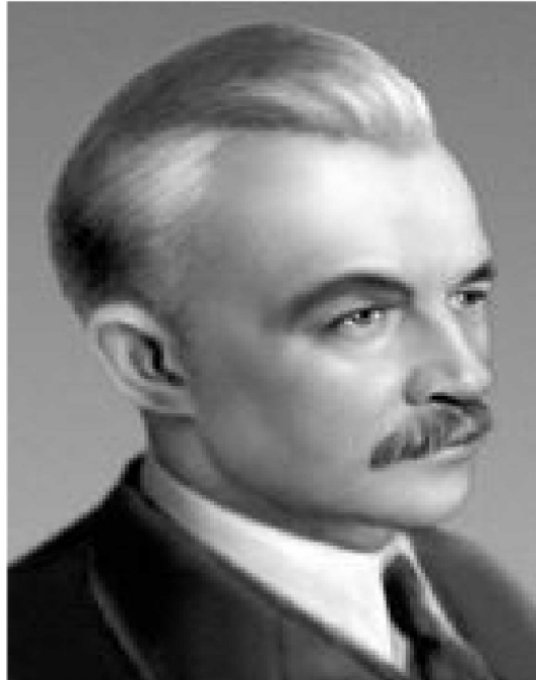
⁵ Radio frequency - RF

⁶ D. A. Rozhansky

⁷ Velocity modulation

⁸ Leningrad Polytechnic Institute

⁹ Agnessa Arsenjeva



شکل ۱-۱: تصویر پروفیسور روزانسکی.

اسکار هیل^۱، همسر اگنس، فارغ التحصیل دانشگاه گوتینگ^۲ در سال ۱۹۳۴ پروژه‌ی بررسی و تولید دستگاه موج کوتاه را بدست گرفت. بنابراین این زوج به آزمایشگاه کاوندیش^۳ در کمبریج رفتند و مطالعات خود را با رادرفورد ادامه دادند. در سال ۱۹۳۵ آنها مقاله‌ی خود را در ارتباط با مدولاسیون سرعت و دسته بندی الکترون‌ها منتشر کردند.

در طی همان سال اگنس هیل به روسیه بازگشت و اسکار هیل به مرکز کابل و تلفن استنفورد^۴ در انگلستان رفت. این مرکز طرحی از هیل، به نام تیوب هیل را توسعه داد و آن را نوسان ساز خط کوآکسیال^۵ نامید. شکل ۱-۲ تیوب ساخت او را نشان می‌دهد.

اسکار هیل مرکز کابل و تلفن استنفورد را یک روز قبل از ورود انگلستان به جنگ ترک کرد و کارش را در برلین^۶ ادامه داد. تیوب‌های او در جنگ جهانی دوم مورد استفاده قرار گرفتند.

¹ Oskar Heil

² Goettingen University

³ Cavendish laboratory

⁴ Standard Telephone and Cables(STC)

⁵ Coaxial-line Oscillators

⁶ Standard Lorentz