بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرّس

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق

آنالیز و طراحی اسیلاتورهای موج میلیمتری مبتنی بر موج

نگارنده

ابوالحسن احمدی حاجی

استاد راهنما

دکتر عبدالرضا نبوی

تابستان ۱۳۹۲

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای **ابوالحسن احمدی حاجی** پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **آنالیز و طراحی اسیلاتورهای موج میلی متری مبتنی بر موج** در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۳۰ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد الکترونیک پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر عبدالرضا نبوی لیشی	استاد	
استاد ناظر	دکتر ابومسلم جان نثاری	استادیار	
استاد ناظر	دکتر سعید سعیدی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر احسان اله کبیر	استاد	
استاد ناظر	دکتر محمود کمره ای	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر ابومسلم جان نثاری	استادیار	

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی
ابراهیم احمدی حاجی
امضاء
۱۳۹۲/۷/۲۰

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/~~رساله دکتری نگارنده~~ در رشته مهندسی برق الکترونیک است که در سال ۱۳۹۲ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر عبدالرضا نبوی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب ابوالحسن احمدی حاجی دانشجوی رشته مهندسی برق الکترونیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: ابوالحسن احمدی حاجی

تاریخ و امضاء: ۹۲/۷/۲۰

تقدیم به پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند؛ و سلام و درود بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر اللّه عزّ و جلّ":

از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده‌اند؛

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر عبدالرضا نبوی که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند.

از جناب آقای دکتر سعید سعیدی و آقای مهندس نیک پیک به خاطر مباحثاتی که با ایشان برای درک بهتر تحلیل اسیلاتور مبتنی بر موج داشتم بسیار متشکرم؛ و اساتید معزز گروه آقای دکتر کبیر و آقای دکتر جان نثاری به خاطر آموخته‌هایم در طول این دوره متشکرم.

در خاتمه لازم می‌بینم از اعضای آزمایشگاه میکروالکترونیک دانشگاه تربیت مدرس، بالاخص آقایان مهندس صادق پور،حسنی، بیگی زاده، قربانی نژاد و سایر دوستان که با من همراه بودند تشکر نمایم.

ابوالحسن احمدی حاجی شهریورماه ۱۳۹۲

چکیده

این پایان‌نامه به بررسی و طراحی اسیلاتورهای مبتنی بر موج[۱] می‌پردازد. اسیلاتورهای مبتنی بر موج، اسیلاتورهایی هستند که از تکنیک‌های مایکروویوی بهره می‌برند تا امکان استفاده از بیشینه ظرفیت یک تکنولوژی در فرکانس‌های بالا را فراهم نمایند. هدف اصلی این پایان‌نامه افزایش گستره‌ی فرکانس خروجی اسیلاتور در این نوع اسیلاتورها با ساختار خروجی چندفازه می‌باشد. ابتدا به کمک آنالیز اسیلاتور موج رونده[۲]، تلفات وابسته به خط انتقال در این نوع اسیلاتور کاهش داده می‌شود، سپس به بررسی فرکانس خروجی اسیلاتور و ارائه تکنیکی برای افزایش گستره‌ی فرکانس خروجی می‌پردازیم. در نهایت با استفاده از این تکنیک، اسیلاتوری با خروجی ۸ فازه، گستره‌ی فرکانس خروجی ۳.۱ گیگاهرتز و نویزفاز ۱۰۱dBc/Hz- در آفست ۱ مگاهرتز، نزدیکی فرکانس مرکزی ۳۱.۵ گیگاهرتز طراحی شده است. این اسیلاتور، توان ۲۷.۴ میلی وات از یک منبع ولتاژ ۱.۸ ولتی مصرف می‌نماید. برای طراحی از نرم‌افزار شبیه‌سازی ۰.۱۸ µm tsmc برای تکنولوژی CMOS استفاده کردیم.

کلیدواژه: اسیلاتور مبتنی بر موج، خط انتقال، موج رونده[۳]، موج ساکن[۴]، گستره‌ی فرکانس خروجی[۵].

---

[۱] Wave based oscillator.

[۲] Rotary traveling wave oscillator.

[۳] Travelling wave.

[۴] Standing wave.

[۵] Output frequency tuning range.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علائم و نشانه‌ها ..... و

فهرست جدول‌ها ..... ز

فهرست شکل ..... ح

فصل ۱- پیشگفتار ۲

۱-۱- پیش‌زمینه ۲

۱-۱-۱- روند تکامل تکنولوژی ۲

۱-۱-۲- القاگر CMOS ۳

۱-۱-۳- حساسیت نسبت به تغییرات ۴

۱-۲- اهداف پایان‌نامه ۵

۱-۳- فرضیات پایان‌نامه ۷

۱-۳-۱- تلف خط انتقال ۷

۱-۳-۲- نوع خط انتقال ۸

۱-۴- ساختار پایان نامه ۸

فصل ۲- پیش‌زمینه ۱۱

۲-۱- پیشگفتار ۱۱

۲-۲- شرط نوسان اسیلاتور ۱۱
۲-۳- نویزفاز اسیلاتور ۱۳
۲-۴- فاکتور شایستگی ۱۷
۲-۵- دسته‌بندی اسیلاتورها ۱۷
۲-۶- تقویت‌کننده‌ی گسترده ۱۹
۲-۷- اسیلاتورگسترده ۲۳
۲-۸- اسیلاتور موج ساکن ۲۶
۲-۸-۱- تحلیل اسیلاتور موج ساکن ۲۷
۲-۸-۲- اسیلاتور موج ساکن دایروی ۳۱
۲-۸-۳- استفاده از خط انتقال با طول سوییچ شده ۳۲
۲-۹- نتیجه‌گیری ۳۴
فصل ۳- اسیلاتور موج رونده ۳۶
۳-۱- پیشگفتار ۳۶
۳-۲- اسیلاتور موج رونده ۳۷
۳-۲-۱- سازوکار اسیلاتور موج رونده ۳۸
۳-۲-۲- نویز فاز اسیلاتور موج رونده ۴۲
۳-۲-۳- مشکل نوسان در فرکانس بالا ۴۵
۳-۳- شرط نوسان در اسیلاتور موج رونده ۴۸

۳-۴- تلفات در اسیلاتور موج رونده ۵۲
۳-۵- اثر طول خط اتصال کوتاه بر فرکانس کار اسیلاتور ۵۵
۳-۶- تکنیک سوییچ خط انتقال ۵۷
۳-۷- طراحیVCO بر پایه اسیلاتور موج رونده با پهنای باند وسیع ۵۹
۳-۷-۱- طراحی خط انتقال بهینه ۵۹
۳-۷-۲- طراحی سوییچ برای خط انتقال سوییچ شده ۶۳
۳-۷-۳- توپولوژی‌های مختلف مقاومت منفی ۶۴
۳-۷-۴- ورکتور ۶۸
۳-۷-۵- جانمایی خط انتقال تفاضلی موبیوس ۷۰
۳-۸- نتایج شبیه‌سازی ۷۱
۳-۹- نتیجه‌گیری ۷۳
فصل ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای کارهای آینده ۷۵
۴-۱- نتیجه‌گیری ۷۵
۴-۱-۱- تحلیل کارهای گذشته ۷۵
۴-۱-۲- بررسی تلفات اسیلاتور موج رونده ۷۵
۴-۱-۳- طراحی VCO با گستره‌ی تنظیم فرکانس خروجی بالا ۷۶
۴-۲- پیشنهادهایی برای کارهای آینده ۷۷
۴-۲-۱- بررسی خطای فاز ۷۸

۴-۲-۲- طراحی مدارهای TIA با تقویت‌کننده گسترده ۷۸

۴-۲-۳- عبور از فرکانس گذر ۷۸

واژه نامه‌ی فارسی به انگلیسی أ

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
ثابت انتشار فاز	β
ثابت تضعیف	α
ثابت انتشار	γ
طول موج	λ
فرکانس نوسان	ω

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱ مقایسه‌ی نتیجه‌ی شبیه‌سازی و محاسبات. ۵۷

جدول ۳-۲ پارامترهای خط انتقال طراحی‌شده در فرکانس ۳۳ گیگاهرتز. ۶۲

جدول ۳-۳ اندازه ترانزیستورهای مدار شکل ۳-۲۰. ..... ۶۷

جدول ۴-۱ مقایسه VCO های مبتنی بر موج. ۷۷

فهرست شکل

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ روند تغییر fT، fmax و Lgate با توجه به سال [۳]. ۳

شکل ۱-۲ ساختار فرستنده قطبی بدون استفاده از میکسر. شکل از[۳۸]. ۶

شکل ۲-۱ سیستم فیدبک. ۱۱

شکل ۲-۲ میراشدن نوسانات مدار تانک موازی. ۱۲

شکل ۲-۳ ایده مدل مقاومت منفی. ۱۳

شکل ۲-۴ طیف خروجی اسیلاتور در اطراف حامل. ۱۴

شکل ۲-۵ پدیده‌ی ضرب فرکانسی دوجانبه [۲]. ۱۵

شکل ۲-۶(آ) اسیلاتور حلقوی. (ب) شکل موج خروجی اسیلاتور حلقوی. ۱۸

شکل ۲-۷ اسیلاتور کلپ. ۱۸

شکل ۲-۸ مدار تقویت‌کننده گسترده[۱۳]. ۱۹

شکل ۲-۹ اسیلاتور گسترده[۱۳]. ۲۳

شکل ۲-۱۰ خط انتقال اتصال کوتاه. ۲۷

شکل ۲-۱۱ ولتاژ در طول خط انتقال در اسیلاتور موج ساکن. ۲۹

شکل ۲-۱۲ جریان در طول خط انتقال در اسیلاتور موج ساکن. ۲۹

شکل ۲-۱۳ نمودار ولتاژ برای هارمونی سوم [۲۴]. ۳۱

شکل ۲-۱۴ اسیلاتور دایروی[۵۳]. ۳۲

شکل ۲-۱۵ اسیلاتور LC معمولی با استفاده از خازن‌های سوییچ شده برای تغییر باند نوسان. ۳۳

شکل ۲-۱۶ مدار اسیلاتور موج ساکن با طول خط انتقال سوییچ شده[۱۰]. ۳۳

شکل ۳-۱ خط انتقال منتهی شده به امپدانس مشخصه‌ی خط. ۳۸

شکل ۳-۲ تحقق فیدبک برای اسیلاتور موج رفت. ۳۹

شکل ۳-۳ خط تفاضلی موبیوس. ۴۰

شکل ۳-۴ اینورترها برای جبران تلفات خط انتقال. ۴۱

شکل ۳-۵ مسیر حرکت موج در خط انتقال موبیوس. ۴۱

شکل ۳-۶ اسیلاتور موج رونده CMOS. ۴۲

شکل ۳-۷ مدل کردن خط موبیوس با یک خط موج ساکن[۳۲]. ۴۳

شکل ۳-۸ نمایش اختلاف فاز بین مد نوسانی هر بلوک مقاومت منفی. الف، مدار اسیلاتور موج رونده. ب، مدار معادل اسیلاتور موج رونده بر حسب موج ساکن[۳۲]. ۴۳

شکل ۳-۹ (آ) خط موبیوس مدل شده برای یک مقاومت. ب، مدل مداری برای یک بلوک مقاومت منفی. ۴۴

شکل ۳-۱۰ بار القایی برای افزایش امپدانس مشخصه معادل خط. ۴۷

شکل ۳-۱۱ مدار اسیلاتور موج رونده با استفاده از بارگذاری سلفی. ۴۹

شکل ۳-۱۲ مدل اسیلاتور موج رونده. ۵۰

شکل ۳-۱۳مدار معادل بین V۱ و V۲. ..... ۵۱

شکل ۳-۱۴ مقدار حقیقی Yn بر حسبLs/Lc. ۵۴

شکل ۳-۱۵ نمودار نویز فاز بر حسب Ls/Lc. ۵۵

شکل ۳-۱۶ نمودار $|A^4+1|$ بر حسب فرکانس. ۵۶

شکل ۳-۱۷ اسیلاتور موج رونده با استفاده از خط انتقال سوییچ شده برای افزایش گستره نوسان. ۵۸

شکل ۳-۱۸ نمودار R/Z_o^2 بر حسب عرض خط انتقال (W). ۶۱

شکل ۳-۱۹ نمودار امپدانس سوییچ در حالت‌های خاموش و روشن[۱۰]. ۶۴

شکل ۳-۲۰ بلوک مقاومت منفی، با استفاده از ترانزیستورهای PMOS و NMOS. ۶۵

شکل ۳-۲۱ نمودار fT بر حسب $|V_{GS}-V_T|$ [۵۶]. ۶۶

شکل ۳-۲۲ اسیلاتور موج رونده بدون استفاده از PMOS [۲۹]. ۶۶

شکل ۳-۲۳ نویزفاز بر حسب جریان تغذیه برای تحقق های مختلف Yn. ۶۸

شکل ۳-۲۴ (آ) ورکتور MOS. (ب) محدوده تغییرات خروجی آن بر حسب ولتاژ خروجی. ۶۸

شکل ۳-۲۵ ایجاد تقارن در مدار اسیلاتور موج رونده [۲۸]. ۷۰

شکل ۳-۲۶ جانمایی خط انتقال اسیلاتور موج رونده براساس شکل ۳-۲۵ [۲۸]. ۷۱

شکل ۳-۲۷ فرکانس خروجی VCO بر حسب ولتاژ کنترلی برای باندهای نوسان. ۷۲

شکل ۳-۲۸ نویزفاز VCO بر حسب فرکانس نوسان برای باندهای نوسان. ۷۲

شکل ۳-۲۹ ولتاژهای خروجی VCO. ۷۳

فصل اول

پیشگفتار

فصل ۱- پیشگفتار

در این فصل به دلایل پژوهش در زمینه‌ی اسیلاتورهای مبتنی بر موج و انتخاب زمینه‌ی تحقیق می‌پردازیم.

۱-۱- پیش‌زمینه

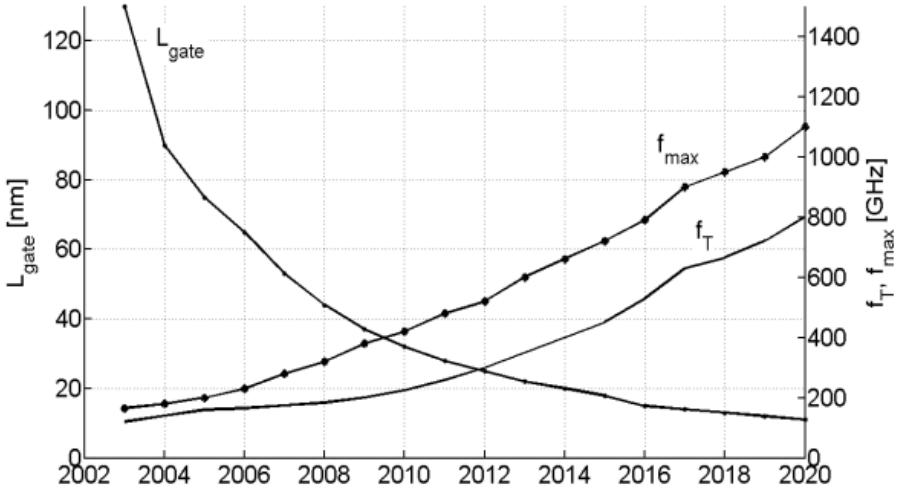
اسیلاتور کنترل شده با ولتاژ، جزء لاینفک سیستم‌های مخابراتی می‌باشد. با توجه به حضور اسیلاتور در تمام سیستم‌های مخابراتی و اهمیت آن تحقیقات بسیاری در مورد فرکانس کار اسیلاتور، نویزفاز، گستره‌ی فرکانس خروجی و توان مصرفی آن انجام شده است. امروزه با توجه به روند پیشرفت تکنولوژی مدارهای مجتمع به سمت جدیدی سوق پیدا کرده است، به وجهی که قابلیت طراحی خطوط انتقال با لایه‌های فلز تکنولوژی CMOS فراهم شده است[۱]-[۲]. این مسئله چه روی طراحی اسیلاتور به عنوان یک زیرسیستم و چه روی طراحی سیستم‌های مخابراتی اثر گذاشته است. در این بخش به شمه‌ای از مسائل فوق می‌پردازیم.

۱-۱-۱- روند تکامل تکنولوژی

شکل ۱-۱، توسط ITRS[۱] ارائه شده است. این شکل روند پیشرفت تکنولوژی را با توجه به مقدار طول کانال گیت ترانزیستور(Lgate)، فرکانس بیشینه انتقال توان(fmax) و فرکانس گذر ترانزیستور (fT) را با توجه به سال نشان داده و یا پیش‌بینی کرده است. با توجه به این نمودار روند کاهش طول گیت ترانزیستور از سال ۲۰۱۶ به بعد اشباع خواهد شد. اثر این مطلب روی فرکانس گذر ترانزیستور در همین نمودار تا حدودی قابل‌مشاهده

[۱] International Technology Roadmap for Semiconductors.

می‌باشد. در آینده‌ی نه چندان دور شاهد ثابت شدن مقدار فرکانس گذر ترانزیستور خواهیم بود. این مسئله بیانگر این مطلب است که بیشینه فرکانس کار مدارات در تکنولوژی سیلیکن به اشباع خواهد رسید.



شکل ۱-۱ روند تغییر fT، fmax و Lgate با توجه به سال [۳].

این مسئله نشان‌گر این می‌باشد که زمان آن رسیده که طراحان به دنبال ایده‌هایی برای استفاده از بیشینه ظرفیت فرکانسی تکنولوژی باشند.

۱-۱-۲- القاگر CMOS

برای کاربردهای مخابراتی گزینه‌ی رایج استفاده از اسیلاتورهای LC می‌باشد. فرکانس یک اسیلاتور LC نوعی که دارای مدار تانک با خازن C و القاگر L می‌باشد با رابطه‌ی (۱-۱) محاسبه می‌شود[۲]. برای کار در فرکانس‌های بالاتر در اولین قدم برای تحقق خازن مدار تانک از خازن‌های پارازیتیکی استفاده می‌کنیم و این خازن‌ها برای هر تکنولوژی از یک سطح معین کمتر نمی‌شوند در نتیجه می‌بایست از القاگر کوچک‌تری استفاده کرد.

$$fosc = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (۱-۱)$$