



## اثر فوتورسانندگی ماندگار در ساختار دور آلائیده معکوس p-Si/SiGe/Si

مریم قلی زاده آرشتی

گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، تهران، ایران.

چکیده - در این مقاله، اثر فوتورسانندگی ماندگار در ساختار دور آلائیده معکوس p-Si/SiGe/Si رشد یافته به روش برآرای پرتو مولکولی، بررسی شده است. در لایه آلیازی این ساختارها (SiGe) گاز حفره‌ای دوبعدی 2DHG با چگالی سطحی  $n_h$  مشاهده شده است که با تابش نور می‌توان چگالی آن را تغییر داد. نتایج تجربی بدست آمده از آزمایش اندازه‌گیری اثر هال مشخص می‌کند که تابش نور قرمز به ساختار در دمای  $4.2^\circ K$  چگالی گاز حفره‌ای دوبعدی و رسانندگی ساختار را افزایش می‌دهد. این افزایش ناشی از جذب نور در لایه پوششی ساختار و تولید زوج الکترون-حفره و خنثی شدن بارهای سطحی است. کلید واژه: ساختار دور آلائیده معکوس، فوتورسانندگی، گاز حفره‌ای دوبعدی.

## Persistent Photoconductivity Effect in p-Si/SiGe/Si Inverted Remote Modulation Structure

Maryam Gholizadeh Arashti

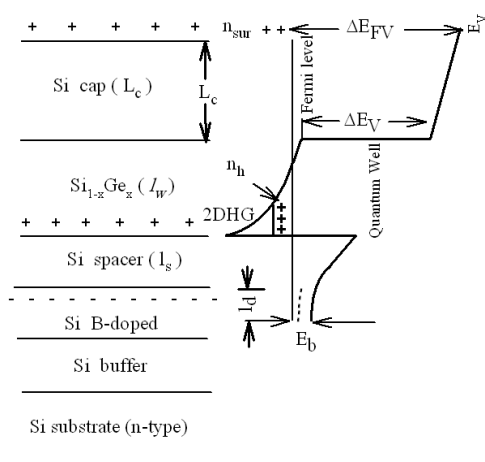
Department of Physics, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract- In this paper, the persistent photoconductivity effect of p-Si/SiGe/Si inverted modulation doped structure grown with molecular beam epitaxy method was investigated. A two dimensional hole gas with areal density  $n_h$  was observed in the alloy layer of these structures which its density can be changed by illumination with LED. The experimental results of Hall effect measurement experiment indicated that illumination of the sample by red light in  $4.2^\circ K$  temperature, leads to enhancing the two dimensional hole gas density and its electrical conductivity. This effect is a consequence of neutralizing the Si surface charges due to photo absorption in the Si cap and electron-hole pairs generation.

Keywords: Inverted remote modulation structure, Photoconductivity, Two dimensional hole gas.

۱- مقدمه

سپس لایه آلاینده به برون با غلظت  $N_A = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و ضخامت 3-20nm به دنبال آن لایه جداگر به ضخامت  $l_s = 5\text{nm}$  و سپس لایه آلیاژی  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  به ضخامت تقریبی 20nm و در خاتمه لایه پوششی Si به ضخامت  $l_w = 17\text{nm}$  در گستره 400-150nm و با آهنگ  $5^\circ\text{A/s}$  و  $\text{Gr} = 0.5-1$  و در دمای  $T_G = 500-700^\circ\text{C}$  رشد داده شده اند. تجربه و نظریه نشان می دهند که به دلیل عدم پیوستگی در نوار ظرفیت این ساختار در محل لایه آلیاژی SiGe یک چاه کوانتومی وجود دارد. مطابق شکل ۱ اگر بخشی از لایه سیلیکان با ناخالصی برون آلاینده شود و در صورتی که فاصله آن تا چاه کوانتومی (ضخامت لایه جداگر) کم باشد حفره‌های وابسته به آلاینده های یونیده به درون چاه کوانتومی انتقال یافته و گاز حفره ای دوبعدی در نزدیکی نیمه بالایی لایه آلیاژی تشکیل می شود و چگالی سطحی این گاز ( $n_h$ ) به درصد Ge در آلیاژ و سایر پارامترهای ساختار ( $l_s$  و  $l_w$  و  $\text{Gr}$  و  $T_G$  و  $N_A$ ) بستگی دارد. وجود حالت‌های سطحی در سطح آزاد لایه پوششی این ساختار میتواند سبب تغییر وضعیت تراز فرمی یا فرو رفتگی چاه کوانتومی در طرف لایه پوششی شود و در نتیجه چگالی سطحی گاز حفره ای دو بعدی تغییر کند در صورتیکه بارهای سطحی بگونه‌ای حذف و یا خنثی شوند چگالی گازحفره‌ای به بیشینه مقدار خود می‌رسد. شکل نوار ظرفیت ساختار معکوس به‌طور طرح وار در شکل ۱ نشان داده شده است [۴-۶].



ش

کل (۱) ترتیب رشد لایه‌ها و ساختار نوار ظرفیت در ساختار مورد مطالعه

با تکامل و توسعه تکنولوژیهای پیشرفته نظیر سیستمهای خلا عالی و تبخیر کنترل شده عناصر و ایجاد باریکه های اتمی، امکان رشد لایه های خالص و نازک (چند نانومتری) نیمرساناها فراهم شده است. همچنین با کمک فرایند آلاینده که بخش مهمی از تکنولوژی نیمه‌رساناها است نیز می‌توان غلظت حامل‌های آزاد در نیمه‌رساناها را تغییر داد. اهدافی که با رشد ساختارهای ناهمگون نوعی A/B/CD/E/F قابل حصول است عبارتند از:

۱- تغییر در ساختار نوری، ۲- تغییر در گاف نوری یک ماده، ۳- ایجاد چاه کوانتومی در نوار رسانش و یا ظرفیت، ۴- انتقال بار در لایه های خاص (چاه کوانتومی) و تشکیل گاز حامل دو بعدی، ۵- تغییر در ثابت شبکه در صفحه رشد و یا در جهت رشد، ۶- ایجاد کرنش فشاری و یا کششی در یک لایه، ۷- ایجاد ترازهای خاص (دهند، پذیرنده و یا عمیق) در گاف نوری و ۸- ایجاد موجبر در لایه معین به واسطه اختلاف در ضریب شکست.

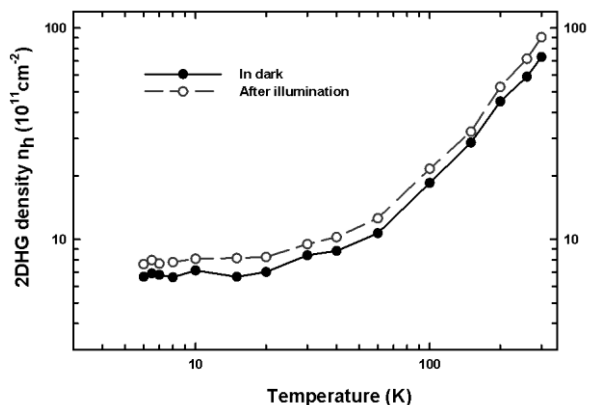
یکی از ساختارهایی که در صنعت الکترونیک و مخصوصاً در ساخت و مطالعه ترانزیستور های اثر میدانی کاربرد دارد ساختار p-Si/SiGe/Si می باشد [۱].

از طرف دیگر، مطالعه فیزیکی اثر فوتورساندگی ماندگار، در ساختارهای مذکور در دهه های اخیر از اهمیت خاصی برخوردار است. فوتورساندگی ماندگار به این معنی است که وقتی اغلب نیمه رساناها در دمای پایین در معرض تابش نوری مناسب (با انرژی بیش از گاف آنها) قرار گیرند، رسانندگی آنها افزایش می‌یابد (فوتورساندگی مثبت) و در بعضی موارد باعث کاهش رسانندگی میشود (فوتورساندگی منفی) و این حالت برای ساعت‌ها خاموش شدن منبع نور ادامه دارد که ترازهای کم عمق دهنده و پذیرنده واقع در گاف نیمه رسانا می‌تواند عامل این پدیده باشد. در این مقاله به بررسی افزایش چگالی سطحی حامل‌ها در چاه کوانتومی در اثر پدیده فوتورساندگی می‌پردازیم. [۲-۳].

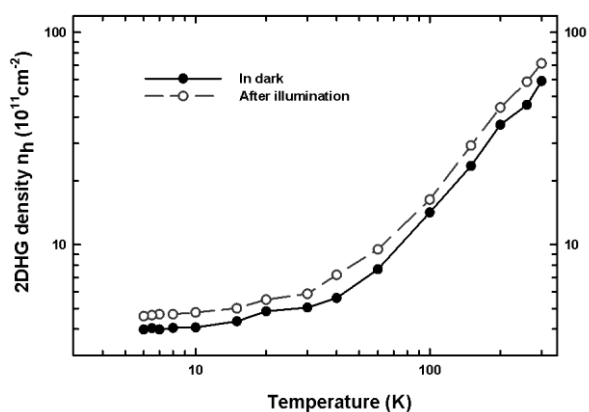
۲- ساختار دور آلاینده معکوس p-Si/SiGe/Si

ساختار تحت مطالعه در دانشگاه واریک انگلستان به روش روشانی پرتو مولکولی روی بستر سیلیکانی رشد داده شده است. ترتیب لایه های ساختار مذکور در شکل ۱ نشان داده شده است. ابتدا لایه میانی به ضخامت حدود 200nm و

## ۲-۱- انجام آزمایش



شکل ۳- تغییرات چگالی گاز حفره‌ای دو بعدی در دو حالت دیود خاموش و روشن برای ساختار A



شکل ۴- تغییرات چگالی گاز حفره‌ای دو بعدی در دو حالت دیود خاموش و روشن برای ساختار B

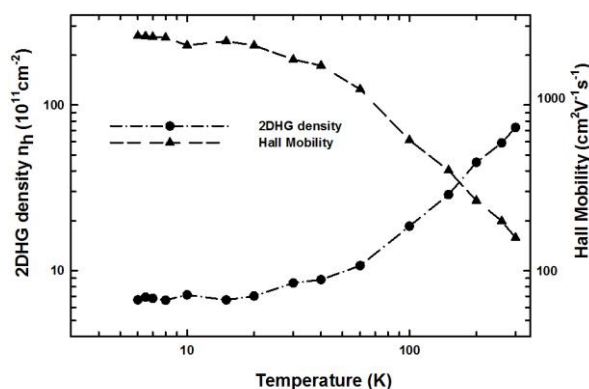
## ۲-۲- بحث و بررسی

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، مشاهده می‌شود که وقتی نمونه در معرض تابش LED قرار می‌گیرد، چگالی سطحی حفره‌ها افزایش می‌یابد. می‌توان توضیح داد که جذب نور در لایه پوششی ساختار، باعث تولید زوج الکترون-حفره در آن می‌شود و بارهای سطحی موجود در سطح ساختار با الکترون-های ایجاد شده در لایه پوششی خنثی می‌شوند و حفره‌ها به داخل چاه کوانتومی منتقل می‌شوند. با کاهش بارهای سطحی، حفره‌های داخل چاه افزایش می‌یابد و در نتیجه خمش نوار نیز در لایه پوششی از بین می‌رود و بدنبال افزایش چگالی گاز حفره‌ای دو بعدی، رسانندگی ساختار

ساختار دورآلاییده معکوس در زمپای یخچالی هلیومی قرار داده شده و در خلا  $10^{-6}$  mbar تا دمای  $4.2$  K در یک محیط کاملاً تاریک سرد شد. یک دیود نورده قرمز با قله گسیل  $640$  nm برای نوردهی به نمونه در نظر گرفته شد. سپس مقاومت طولی گاز حفره‌ای دو بعدی درون کانال با استفاده از جریان بسیار ضعیف ( $30-40$   $\mu$ A) برای جلوگیری از اثر حامل‌های داغ اندازه‌گیری شد. همچنین با انجام آزمایش هال در حضور میدان مغناطیسی تا یک تسلا عمود بر ساختار، چگالی گاز حفره‌ای دو بعدی  $n_h$  نیز اندازه‌گیری شد.

آزمایش برای دو ساختار A و B، ابتدا برای حالت دیود خاموش و بار دیگر در حالت دیود روشن انجام شد.

در ابتدا جهت مشخص شدن نحوه تغییرات چگالی گاز حفره‌ای و تحرک پذیری بر حسب دما در حالت دیود خاموش نتایج مربوط به ساختار اول (A) در شکل ۲، آورده شده است. با توجه به شکل، مشخص است که با کاهش دمای نمونه، چگالی حفره‌ها کاهش می‌یابد و با توجه به کاهش پراکندگی‌های فونونی در دمای پایین، تحرک‌پذیری حفره‌های موجود در ساختار نیز افزایش یافته است [۷-۸].



شکل ۲- تغییرات چگالی گاز حفره‌ای دو بعدی و تحرک پذیری بر حسب دما برای ساختار A

در ادامه جهت بررسی اثر فوتو رسانندگی در دو حالت دیود خاموش و دیود روشن آزمایش را برای دو ساختار A و B انجام داده و نتایج در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شدند.

- [4] M. A. Sadeghzadeh, et al., "Issues on molecular beam epitaxial growth of p-SiGe inverted modulation doped structures"; Appl. Phys. Lett. 74,579-581, 1999.
- [5] M.A.Sadeghzadeh. et al, "wave function –dependent mobility and suppression of interface roughness scattering in a strained SiGe channel field effect transistors".App.Phys.Lett.76(۱۸),2568-2570,2000.
- [6] M. A. Sadeghzadeh, et al., "Study of two-dimensional hole gas at Si/SiGe/Si inverted interface", Acta physica polonica A, 94 (3) ,501-503,1998.
- [7] M. G. Arashti, A. Sadeghzadeh, "Electrical characterization of Si(100) surface at p-Si/SiGe/Si structure using low temperature Hall measurement analysis, Vacuum, 93,1-6,2013.
- [8] M. G. Arashti, A. Sadeghzadeh, "low temperature Electrical characterization of the Ti/Si(100) interface at the p-Si/SiGe/Si-Ti structure using Hall measurement analysis, Phys. Scr. 88,2571,2013.

بیشتر میشود. به این ترتیب اثر فوتورساندگی مثبت در ساختار مشاهده میشود.

از طرف دیگر، یونیزاسیون ترازهای کم عمق پذیرنده احتمالی زیر تراز فرمی در لایه جداگر نیز تا حدی می‌تواند عامل این پدیده باشد که در اینصورت حفره‌های حاصل به درون کانال منتقل می‌شوند و چگالی حفره‌ها افزایش می‌یابد اما الکترون‌ها در تله‌های حفره‌ای لایه جداگر به دام می‌افتند.

اما پس از خاموش شدن منبع نور، حفره‌های موجود در کانال از طریق پدیده تونل زنی حفره- ناخالصی به مراکز بازترکیب (ترازهای ناخالصی) یونیزه شده مجاور نفوذ کرده و سپس با تراز ناخالصی جایگزیده بازترکیب می‌شوند و این عامل کاهش چگالی گاز حفره‌ای پس از خاموش شدن منبع نور است. هرچه فاصله این ترازهای ناخالصی از چاه بیشتر باشد، احتمال تونل زنی کمتر است.

### ۳- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که با تابش نور به ساختارهای تحت مطالعه، چگالی حفره‌های موجود در کانال افزایش می‌یابد که ناشی از جذب نور در لایه پوششی Si و تولید زوج الکترون- حفره و به تبع آن خنثی شدن بارهای سطحی لایه پوششی سیلیکن است.

### سپاسگزاری

آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه حالت جامد تحقیقاتی دانشگاه یزد انجام شده است. به این وسیله مولف از مساعدت‌های آقای دکتر صادق زاده جهت راهنمایی‌های ایشان سپاسگزاری می‌نماید.

### مراجع

- [1] L. Minjoo, et al., "Strained Si, SiGe, and Ge channels for high mobility metal oxide semiconductors field effect transistors"; J. Appl. Phys., 97, 011101, 1-28,2005.
- [2] Stadnik V. A, Mitchell E. E, Clark R.G, Fang F.F, Wang P. J, Meyerson B. S, " Effect of illumination on transport properties of the high mobility 2D hole gas in Si-SiGe heterostructures", Physica B, 246(1-4),386-390,1998.
- [3] Vijayara ghavan M. N, Venkataraman V, Xie Y. H,"Ultra – sensitive photoconductivity in modulation doped Ge/SiGe and Si/SiGe hetrostructures", Semicond. Sci. Technol, 15,957,2000.