بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

اثر میدان مغناطیسی بر رفتار حالتهای اسپینی و وابستگی آن به تراز انرژی در سیلیسن

سارا راستگو، فواد پارسایی

rastgoo@sirjantech.ac.ir

fparsaei@gmail.com

بخش فیزیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

چکیده- در این مقاله رفتار زمانی قطبش اسپین الکترون π در سیلیسن بررسی می‌شود. میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی عمود بر ورقه سیلیسن در نظر گرفته می‌شود. عملگر تحول زمانی را نوشته و با در نظر گرفتن یک حالت اولیه، حالت تحول یافته را به دست می‌آوریم. سپس به کمک تعریف قطبش اسپینی، رفتار زمانی مؤلفه‌های اسپین الکترون را به دست می‌آوریم. طبق نتایج ما ، رفتار زمانی قطبش اسپینی حاکی از یک رفتار نوسانی است که در برخی شرایط به‌صورت رمبش و احیا نمایان می‌شود. با افزایش میدان مغناطیسی، دوره تناوب نمودارها تغییر می‌کند. نشان می‌دهیم تراز انرژی و میدان مغناطیسی تأثیر موازی بر قطبش اسپینی دارند.

کلید واژه- سیلیسن، قطبش اسپینی، میدان مغناطیسی

Effect of the Magnetic Field on the Spin States of $\pi-$Electrons in Silicene

Sara Rastgoo , Foad Parsaei

Physics Department, Sirjan University of Technology, Sirjan 78137, Iran

In the present article the temporal behavior of the spin polarization of the $\pi-$electrons in the silicene is studied. Vertical electric and magnetic field on the silicene sheet is considered. We calculate the time evolution operator and then the state of the system at time t is determined. Using the state of the system at any time t, the temporal behavior of the spin polarization is derived. Our results indicate that the dynamical behavior of spin states obeys the oscillatory behavior which presents collapse and revival pattern in some cases. As magnetic field increases, the period of the pattern changes. Furthermore, energy states and magnetic field have similar influence.

Keywords: Magnetic field, Silicene, Spins Polarization.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

مقدمه

سیلیسن، به‌عنوان یک ساختار لانه‌زنبوری دوبعدی، از اتم‌های سیلیکان تشکیل شده است و سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. سیلیسن شباهت‌های زیادی به گرافن دارد ولی چند تفاوت اساسی با یکدیگر دارند. با توجه به شعاع نسبتاً زیاد اتم‌های سیلیکان، سیلیسن ساختار خمیده دارد[1]. سیلیسن دارای جفتیدگی اسپین- مدار نسبتاً بزرگی است و به همین علت، برخلاف گرافن، الکترون‌های دیراک دارای جرم هستند. این جرم به‌صورت تجربی با اعمال میدان الکتریکی خارجی قابل‌کنترل است[2]. علاوه بر این، سیلیسن به‌عنوان یک عایق توپولوژیکی، قابلیت تغییر فاز کوانتومی دارد. با تغییر میدان الکتریکی خارجی، سیلیسن بین فازهای عایق بدیهی و عایق باند گذار کوانتومی انجام می‌دهد[3]. به‌کارگیری درجه آزادی اسپینی، به‌منظور انجام عملیات سرعت‌بالا و همچنین ذخیره انرژی در دستگاه‌های الکترونیکی حائز اهمیت است. ذخیره اطلاعات روی درجه آزادی اسپینی، اساس فرآیندهای اطلاعات کوانتومی است[4]. در چنین فرآیندهایی، حمل اسپینی در دمای اتاق، زمان راحتی اسپینی طولانی و ... ، بسیار اساسی است[5]. یک گزینه مناسب برای انجام فرآیندهای اسپینی، سیلیسن است. هدف این پژوهش بررسی دینامیک قطبش اسپینی در حضور یک میدان مغناطیسی یکنواخت عمود بر ورقه سیلیسن و وابستگی آن به تراز انرژی است. نتایج به دست آمده می‌توانند در مباحث مربوط به اسپینترونیک مورد استفاده قرار گیرند.

هامیلتونی

ورقه سیلیسن در صفحه xy در نظر گرفته می‌شود. با اعمال میدان مغناطیسی عمودی $\vec{B}=(0,0,B)$، هامیلتونی برحسب عملگرهای نردبانی به شکل زیر نمایش داده می‌شود(برای جزئیات بیشتر به مرجع [6] مراجعه شود) :

$$H=\hbar\omega(\tau\sigma_{+}a+\tau\sigma_{-}a^{\dagger}-\sigma_{+}a-\sigma_{-}a^{\dagger}) + \lambda_{SO}\tau\sigma_{z}s_{z}-\Delta_{z}\sigma_{z} \qquad (۱)$$

به‌طوری که $\omega=\frac{v_f}{l_B\sqrt{2}}$ و $l_B=(\frac{\hbar}{eB})^{1/2}$ طول مغناطیسی است. همچنین τ عملگر وادی است. مشاهده می‌شود که عملگر کازیمیر $\hat{N}_e=a^{\dagger}a+\sigma_{+}\sigma_{-}+s_{+}s_{-}+\tau_{+}\tau_{-}$ با هامیلتونی جابجا می‌شود. بنابراین هامیلتونی نسبت به‌ویژه مقادیر عملگر $\hat{N}_e$ (که با N_e نمایش داده خواهد شد) قطعه- قطری است. حالت متناظر با $N_e=0$، یک قطعه 1×1 در ماتریس هامیلتونی را نتیجه می‌دهد. حالت متناظر با $N_e=1$، یک قطعه 4×4 را در هامیلتونی می‌دهد. حالت‌های متناظر با $N_e=2$ منجر به یک قطعه 7×7 در هامیلتونی می‌شود. برای $N_e>2$، هامیلتونی دارای قطعه‌های 8×8 می‌باشد[6]. انرژی و ویژه‌حالت‌های انرژی به‌صورت تحلیلی قابل محاسبه هستند، ولی به‌منظور خلاصه‌سازی از آوردن آن‌ها اجتناب می‌شود..

تحول زمانی قطبش اسپینی

با استفاده از شکل قطری هامیلتونی که در بخش قبل تشریح شد، عملگر تحول زمانی $U_{original}=VU_{diagonal}V^{\dagger}$ در پایه‌هایی که حالت اولیه نوشته شده است، به دست می‌آید. که $U_{diagonal}=\exp(-iHt/\hbar)$ عملگر تحول زمانی در پایه‌های هامیلتونی و V ماتریس تبدیل است. فرض کنید حالت سیستم در لحظه $t=0$ به‌صورت زیر باشد:

$$|\psi(0)\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}|B,n+3,K\rangle\otimes(|+\rangle+|-\rangle) \qquad (۲)$$

که نشان‌دهنده آن است که الکترون π در زیرشبکه B با تراز لانداو $n+3$ قرار دارد و اسپین در امتداد محور x قطبیده شده است. مشخص است که حالت اولیه سیستم از دو ویژه‌حالت عملگر کازیمیر مربوط به دو بلوک مجاور هامیلتونی، N و $N+1$، تشکیل شده است. بنابراین تحول زمانی این حالت به کمک دو بلوک مجاور در عملگر تحول زمانی انجام می‌شود.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

$$|\psi(t)\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(U_1|B,n+3,K,+\rangle+U_2|A,n+2,K,+\rangle \\ +U_3|A,n+2,K,-\rangle+U_4|B,n+3,K,-\rangle) \quad (۳)$$

به‌طوری که

$$U_1=\alpha_1^{\,2}e^{-i\lambda_1 t/\hbar}+\beta_1^{\,2}e^{i\lambda_2 t/\hbar},\quad U_3=\alpha_2\beta_2(e^{-i\lambda_2 t/\hbar}-e^{i\lambda_2 t/\hbar})$$
$$U_2=\alpha_1\beta_1(e^{-i\lambda_1 t/\hbar}-e^{i\lambda_1 t/\hbar}),\quad U_4=\beta_2^{\,2}e^{-i\lambda_2 t/\hbar}+\alpha_2^{\,2}e^{i\lambda_2 t/\hbar}$$

و

$$E_i=\lambda_{SO}+(-1)^i\Delta_z \quad ,\lambda_i=\sqrt{(E_i)^2+4\hbar^2\omega^2(n+3)}\}$$
$$\alpha_i=\frac{2\hbar\omega\sqrt{n+3}}{\sqrt{4\hbar^2\omega^2(n+3)+(E_i-\lambda_i)^2}},\beta_i=\frac{E_i-\lambda_i}{2\hbar\omega\sqrt{n+3}}\alpha_i$$

که $i=1,2$. به کمک روابط اخیر، مقادیر چشمداشتی مؤلفه‌های اسپینی را محاسبه می‌کنیم. مقدار چشمداشتی مؤلفه z اسپین برابر صفر حاصل می‌شود و گفته می‌شود که اسپین در صفحه xy قطبیده شده است. برای بررسی دقیق‌تر رفتار زمانی مؤلفه‌های اسپینی، دو کمیت بدون بعد r و s را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$r=\frac{\Delta_z}{\lambda_{SO}},\qquad s=\frac{\hbar^2 v_f^{\,2}}{2e\lambda_{SO}}(n+3)B \quad (۴)$$

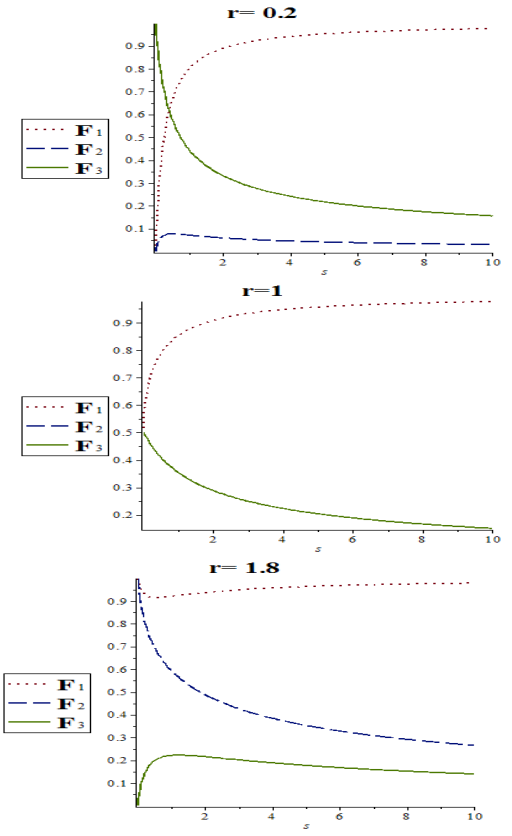
اکنون می‌توان نشان داد که مؤلفه‌های اسپینی به طور کلی به شکل زیر می‌باشند

$$<S_x(t)>=F_1(r,s)\cos(\omega_1 t)+(1-F_1(r,s))\cos(\omega_2 t)$$
$$<S_y(t)>=F_2(r,s)\sin(\omega_1 t)+F_3(r,s)\sin(\omega_2 t) \quad (۵)$$

با استفاده از نتایج به دست آمده، رفتار مؤلفه‌های اسپینی بر حسب زمان در بخش بعد مورد بحث و نتیجه گیری قرار خواهد گرفت.

نتایج

. رفتار مؤلفه‌های اسپینی در حالت کلی با رسم تغییرات ضرایب F_1، F_2 و F_3 بر حسب s، به ازای چند r ثابت، در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین در جدول (۱)، رفتار حدی این ضرایب ارائه شده است. با توجه به جدول (۱)، که از نتایج شکل (۱) حاصل می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که وقتی s به اندازه کافی بزرگ باشد، مؤلفه x اسپین به‌صورت سینوسی نوسان می‌کند و دیگر مؤلفه‌ها صفر می‌شوند. ازآنجایی‌که میدان مغناطیسی و تراز انرژی به‌صورت جفت شده در پارامتر s ظاهرشده‌اند



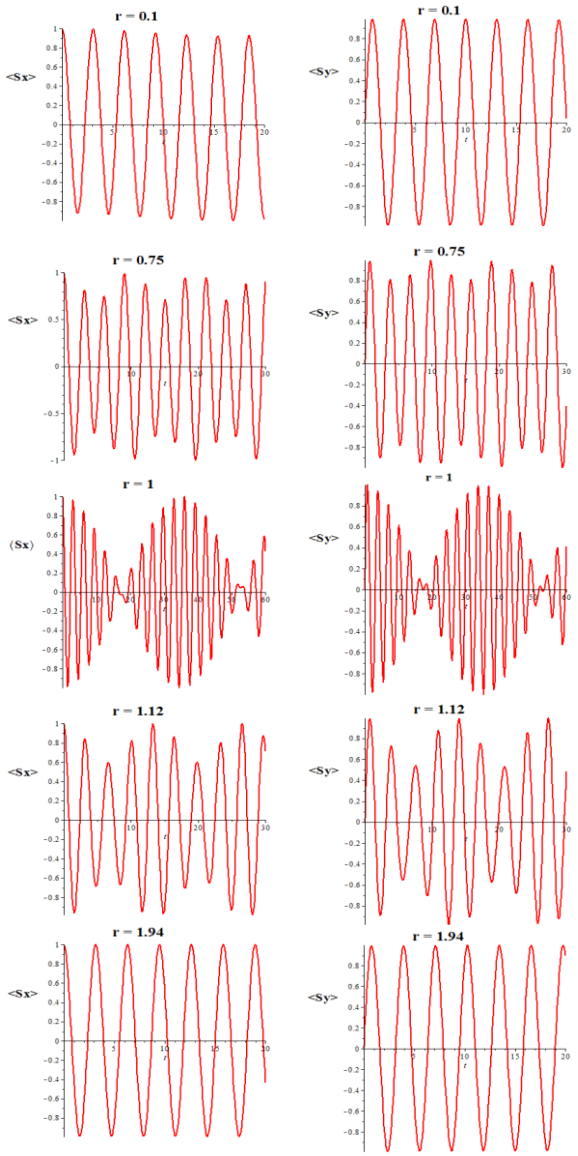
شکل۱: رفتار کلی ضرایب F_1,F_2,F_3 بر حسب s، به ازای چند r مختلف.

(رابطه (۴))، افزایش هر یک از این کمیت‌ها می‌تواند چنین تأثیری داشته باشد. در شکل (۲) نمودار تغییرات فرکانس بر حسب s رسم شده است. با افزایش s، فرکانس ω_2 افزایش و ω_1 کاهش می‌یابد. بدیهی است با توجه به جدول (۱) و رابطه (۵)، در s های به قدر کافی بزرگ، فقط ω_1 تأثیرگذار خواهد بود و در s های به قدر کافی کوچک، این تأثیرگذاری بستگی به پارامتر کمانش خواهد داشت. در شکل (۳) مؤلفه‌های اسپینی بر حسب زمان به ازای چند پارامتر کمانش مختلف، برای یک s ثابت، رسم شده است. رفتار مؤلفه x اسپین برای $r\square 1$، تقریباً به‌صورت کسینوسی و برای مؤلفه y، به‌صورت سینوسی می‌باشد. این رفتار با افزایش r، الگوی سینوسی و کسینوسی را به تدریج از دست می‌دهد تا اینکه در $r=1$ ، الگوی نوسان به‌صورت رمبش و احیا درمی‌آید. با افزایش مجدد r، الگوی نوسان به تدریج به شکل سینوسی و

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

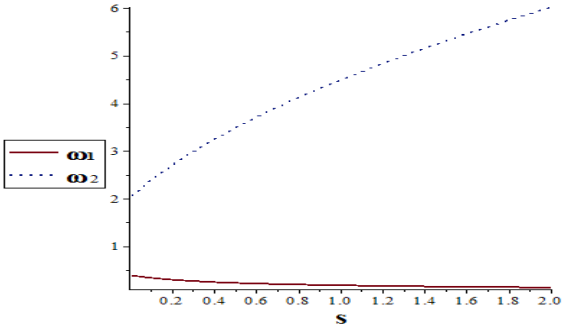
کسینوسی باز خواهد گشت. شکل (۳) نشان می‌دهد که در حالت کلی، رفتار حالت‌های اسپینی به پارامتر کمانش نیز وابسته است.



شکل ۳: تغییرات مؤلفه‌های اسپینی بر حسب زمان به ازای یک s ثابت برای چند r مختلف .

نتیجه‌گیری

مؤلفه z اسپین برابر صفر حاصل می‌شود. برای s کوچک، تحول زمانی مؤلفه‌های اسپینی، علاوه بر میدان مغناطیسی و تراز انرژی، به پارامتر کمانش نیز وابسته است. افزایش انرژی الکترون، تأثیری همانند میدان



شکل ۲: تغییرات فرکانس بر حسب s به ازای یک r ثابت .

		F_1	F_2	F_3
$s \to 0$	$r<1$	0	0	1
	$r=1$	0.5	0.5	0.5
	$r>1$	1	1	0
$s \to \infty$	$r<1$	1	0	0
	$r=1$	1	0	0
	$r>1$	1	0	0

جدول ۱: رفتار حدی ضرایب F_1, F_2, F_3.

مغناطیسی بر روی تحول زمانی اسپینی دارد. در s های کوچک الگوی نوسانی در ابتدا به صورت سینوسی است که در $r=1$ به‌صورت رمبش و احیا درمی‌آید.

مراجع

[1] C. J. Tabert and E. J. Nicol, “AC/DC Spin and Vallet Hall Effect in Silicene and Germanene”, Phys. Rev. B 87 235426 (2013).

[2] M. Ezawa, “Quantum Hall Effect in Silicene’, J. Phys, Soc. Jpn. 81, 064705 (2012).

[3] Y. Ling, P. Liu and J. P. Wu, “Characterization of Quantum Phase Transition Using Holographic Entanglement Entropy”, Phys. Rev. D 93, 126004 (2016).

[4] M. Idrish Miah, “Voltage probe of the optically oriented electron spin relaxation”, Current Science 101, 765 (2011).

[5] Y. S. Dedkov, M. Fonin, U. Rudiger and C. Laubschat,“Rashba Effect in the Graphene/Ni(111) System”, Phys. Rev. Lett. 100, 107602 (2008).

[6] S. Rastgoo, H. Shirkani and M. M. Golshan, “Entanglement Between Electronic States in Silicene and Photons”, Phys. Lett. A. 379, 2048-2052 (2015).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.