

**PENGARUH KETERATURAN LOKAL PADA DENSITAS
KEADAAN FONON SEMIKONDUKTOR AMORF
SILIKON (a-Si:H) DAN AMORF KARBON (a-C:H)**

Efta Yudiarsah¹ dan Rosari Saleh²

ABSTRAK

Kerapatan keadaan vibrasi lokal bahan a-Si, a-C, a-Si:H, dan a-C:H telah dihitung dengan menggunakan metode kekisi Bethe gugus dan model potensial Born. Potensial Born mengikutsertakan dua tetapan kakas tetangga terdekat, yaitu tetapan kakas meruji dan tetapan kakas sudut. Hasil perhitungan memperlihatkan puncak-puncak yang terdapat pada spektrum Raman bahan silikon amorf (a-Si) di pita lintang optik (480 cm^{-1}) dan karbon amorf (a-C) di pita lintang optik (1080 cm^{-1}). Hasil ini juga memperlihatkan bahwa kerapatan keadaan lokal dipengaruhi oleh keberadaan atom H di gugus.

Kata kunci: kekisi Bethe, lakur, potensial Born, modus vibrasi

ABSTRACT

Local densities of vibrational states of a-Si, a-C, a-Si:H and a-C:H materials are obtained by means of a cluster-Bethe-lattice method and Born potential model. Born potential includes two part of nearest neighbour constants of force, namely radial and angular part. The calculation results reproduce the peaks observed in the Raman spectra of amorphous silicon (a-Si) at TO band (480 cm^{-1}) and amorphous carbon (a-C) at TO band (1080 cm^{-1}). It is shown that the existence of H atom in the cluster affected the LDOS.

Keywords: Bethe Lattice, Born Potential, Vibrational State

¹ Program Studi Ilmu Fisika, Program Pascasarjana-UI, Jakarta, 10430

² Jurusan Fisika-FMIPA, Universitas Indonesia, Depok, 16424

I. PENDAHULUAN

Lapisan tipis amorf silikon ($a\text{-Si:H}$) dan amorf karbon ($a\text{-C:H}$) merupakan bahan yang sangat menarik untuk diteliti karena peluang terapan yang luas dari bahan ini pada peralatan optoelektronik (Agrawal dkk. 1989, Street 1993, Bruggemann 1993). Penelitian ini meliputi sifat elektronik dan optik bahan. Kedua sifat ini sangat erat hubungannya dengan struktur mikro kedua bahan semikonduktor amorf ini. Spektroskopi absorpsi inframerah dan hamburan Raman merupakan metode eksperimen yang sering digunakan untuk meneliti struktur mikro $a\text{-Si:H}$ dan $a\text{-C:H}$. Dari hasil pengukuran inframerah dan hamburan Raman, modus vibrasi lokal dapat diketahui.

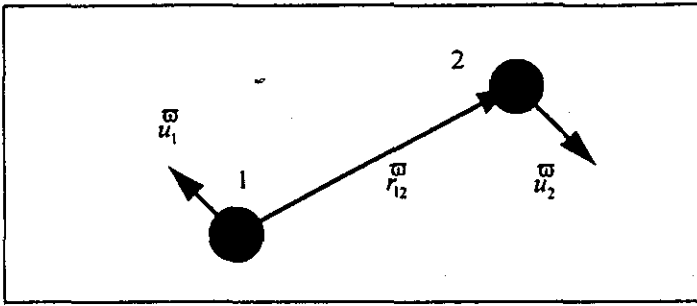
Pada bahan amorf spektrum absorpsi inframerah lebih lebar jika dibandingkan dengan spektrum pada bahan kristal. Pelebaran spektrum pada bahan amorf terjadi karena pada bahan ini tidak ada keteraturan pada rentang jauh (*long-range order*). Ketakteraturan ini disebabkan oleh dua sebab utama yaitu: perubahan sudut ikatan dan ketakteraturan topologi. Sementara struktur lokal tetap teratur, sebagai konsekuensinya, sifat lokal lapisan tipis amorf dan kristal sangat identik (Laughlin dan Joannopoulos 1978, Nagle dkk 1972).

Untuk mempelajari modus vibrasi lokal suatu bahan amorf diperlukan perhitungan kerapatan keadaan. Beberapa metode pendekatan yang telah dipergunakan untuk mempelajari sifat vibrasi pada bahan amorf yaitu sebagai berikut: (i) perhitungan spektrum sejumlah kecil atom-atom yang berikatan (gugus); (ii) pembahasan atom-atom yang berikatan dengan menggunakan kondisi batas kuasi periodik (quasi-periodic); (iii) pembahasan unit-unit molekul yang berinteraksi secara lemah; (iv) menghitung kerapatan keadaan fonon dengan rata-rata statistik kerapatan keadaan fonon pada kristal; (v) menerapkan pendekatan kekisi Bethe gugus (Bethe-Peierl). Tak satu pun dari metode-metode ini benar-benar memuaskan untuk pembahasan semikonduktor grup IV (seperti Si, Ge). Metode (i) mengharapkan atom-atom yang berikatan dalam jumlah besar agar hasil tidak tergantung kondisi batas; metode (ii) tidak diterima untuk menjelaskan struktur bahan ini karena jaringan kontinu yang acak telah diterima untuk

menjelaskan strukturnya; metode (iii) menggunakan konfigurasi lokal secara eksak dalam perhitungan; sedangkan metode (iv) tidak membahas struktur yang sebenarnya sehingga keteraturan rentang pendek dan topologi lokal tidak termasuk dalam perhitungan; dan metode (v) membahas keteraturan rentang pendek secara eksak meskipun tak dapat membedakan topologi susunan atom-atom (Yndurain dan Sen 1976).

Pembahasan modus vibrasi lokal semikonduktor amorf a-Si:H dan a-C:H yang bahan-bahan penyusunnya termasuk grup IV, kecuali hidrogen yang termasuk grup IA, dipilih metode kekisi Bethe gugus, dengan alasan, walaupun tidak dapat membedakan topologi susunan atom-atom, metode ini dapat membahas keteraturan rentang pendek secara eksak yang cukup sesuai untuk bahan amorf. Metode kekisi Bethe gugus merupakan pengembangan metode kekisi Bethe. Kedua metode ini awalnya digunakan untuk mempelajari kerapatan keadaan elektronik pada bahan semikonduktor amorf (Thorpe dan Weaire 1971, Pollard dan Joannopoulos 1978). Kemudian digunakan untuk mempelajari kerapatan keadaan vibrasi pada bahan amorf (Laughlin dan Joannopoulos 1978, Martinez dan Yndurain 1982).

Gugus yang digunakan disini adalah gugus yang terdiri dari lima atom berbentuk tetrahedral. Gugus ini merupakan bagian dari sistem yang didapat dengan mengikatkan lakur SiH di a-Si sebagai induk, sedangkan CH (monohidrit) diikatkan di a-C. Gugus yang digunakan adalah gugus dengan atom pusat Si yang dikelilingi tiga Si dan satu H, juga gugus dengan atom pusat C yang dikelilingi tiga C dan satu H.



Gambar 1. Dua atom yang berinteraksi dalam model potensial Born, r menunjukkan arah ikatan sedangkan u menunjukkan arah getaran.

Penggunaan lakur SiH di lingkungan a-Si dimaksudkan sebagai pendekatan untuk lapisan tipis a-Si:H. Sedangkan lapisan tipis a-C:H didekati dengan menggunakan lakur CH di a-C. Di sini akan diperlihatkan pengaruh keteraturan lokal dan keberadaan atom H terhadap modus vibrasi lokal di lapisan tipis a-C:H dan a-Si:H. Makalah ini diorganisasikan sebagai berikut: pada bagian 2 akan dibahas teori dan metode perhitungan yang digunakan, pada bagian 3 akan dibahas hasil perhitungan kerapatan keadaan lokal, dan pada bagian terakhir akan dikemukakan rangkuman dari bagian sebelumnya.

II. TEORI DAN METODE PERHITUNGAN

Model energi potensial Born akan digunakan untuk menghitung kerapatan keadaan lokal. Gaya-gaya antar atom pada model potensial Born dibatasi antar tetangga terdekat. Energi potensial antara atom 1 dan atom 2 pada model Born diberikan oleh

$$V = \frac{D}{2} [(\hat{u}_1 - \hat{u}_2) \cdot \hat{r}_{12}]^2 + \frac{C}{2} (\hat{u}_1 - \hat{u}_2)^2, \quad (1)$$

dengan \hat{u}_1, \hat{u}_2 adalah perpindahan atom 1,2 dan \hat{r}_{12} adalah vektor satuan yang menghubungkan kedua atom seperti terlihat pada Gambar 1. Dalam model Born

dapat dibedakan antara gaya sentral yang diberikan oleh $D+C$ dan bagian non-sentral yang diberikan oleh C .

Dengan menggunakan model Born, Hamiltonan untuk sistem dengan struktur tetrahedral adalah

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2m_i} + \sum_{ij} \left\{ \frac{3\beta}{4} [(\vec{u}_i - \vec{u}_j) \cdot \vec{p}_{ij}]^2 + \frac{(\alpha - \beta)}{4} (\vec{u}_i - \vec{u}_j)^2 \right\}, \quad (2)$$

dengan m_i adalah massa atom ke i , sedangkan atom ke j adalah tetangga terdekat atom ke i . i dan j berharga dari 1 sampai 4.

Penyelesaian persamaan (2) dapat dicari dengan menggunakan fungsi Green. Matriks fungsi Green $\bar{G}(\omega)$ dapat dituliskan sebagai sebuah persamaan Dyson,

$$\bar{G} = \frac{1}{E - \bar{D}} = \frac{1}{E} - \frac{1}{E} \bar{D} \bar{G} \quad (3)$$

\bar{D} merupakan matriks dinamis, $\bar{E} = m\omega^2 \bar{I}$, dengan \bar{I} adalah matriks identitas.

Kerapatan keadaan lokal (LDOS) pada atom ke j diberikan oleh

$$N_j(\omega) = -\frac{2m\omega}{\pi} \text{Im} \left[\text{Tr}(\bar{G}_{jj}(\omega)) \right]. \quad (4)$$

TABEL I. Tetapan kaku untuk model Born

Ikatan	alfa (α) 10^5 dyne/cm	beta/alfa (β/α)
Si - Si	0,517832276	0,6
C - C	1,125111075	0,6
Si - H	0,753333333	0,697
C - H	1,304545455	0,674

Pada bahan amorf, penyelesaian persamaan (3) sangat sulit. Agar lebih mudah maka digunakan pendekatan kekisi Bethe. Kekisi Bethe adalah jaringan ikatan atom-atom yang mempunyai topologi seperti pohon dengan masing-masing atom mempunyai koordinasi yang sama dengan sistem real yang digantikannya. Geometri tetangga terdekat dan lingkungan lokal pada sebuah atom sama seperti

zat padat amorf. Struktur kekisi Bethe juga tidak mempunyai cincin ikatan dan tidak ada fluktuasi parameter yang disebabkan oleh ketidakteraturan.

Dengan menggunakan metode kekisi Bethe dan teknik matriks transfer/medan efektif, komponen fungsi Green di atom ke nol (atom yang dipilih) diberikan oleh

$$\bar{G}_{00} = \left(m\omega^2 \bar{I} - \bar{D}_0 - \sum_{\mu} \bar{D}_{\mu} \bar{\Phi}_{\mu} \right)^{-1} \quad (5)$$

dengan m adalah massa atom ke nol, \bar{D}_0 adalah matriks dinamik pada atom ke nol, \bar{D}_v matriks dinamik pada arah ikatan antar tetangga terdekat dari atom ke nol sampai atom ke v , sedangkan $\bar{\Phi}_v$ adalah matriks transfer pada atom ke v yang dapat diperoleh dari

$$\left(m\omega^2 \bar{I} - \bar{D}_0 \right) \bar{\Phi}_v = \bar{D}_v + \sum_{\mu \neq v} \bar{D}_{\mu} \bar{\Phi}_{\mu} \bar{\Phi}_v \quad (6)$$

Persamaan (6) dapat diselesaikan dengan mudah secara numerik. Penyelesaian persamaan ini akan menjadi lebih mudah jika simetri struktur yang dibahas diketahui.

Metode kekisi Bethe gugus digunakan pada perhitungan kerapatan keadaan lokal lapisan tipis a-Si:H dan a-C:H. Metode kekisi Bethe gugus ini dikerjakan dengan mengikatkan atom terluar gugus dari struktur yang akan dibahas ke kekisi Bethe yang berperan sebagai pengganti lingkungan di sekitar gugus.

Kerapatan keadaan lokal dihitung dengan menggunakan tetapan-tetapan kakas untuk tiap ikatan seperti pada Tabel I. Kerapatan keadaan lokal yang dihitung dengan tetapan ini kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen berupa puncak-puncak pada modus vibrasi yang ada (Brodsky dkk. 1997, Agrawal dkk. 1989).

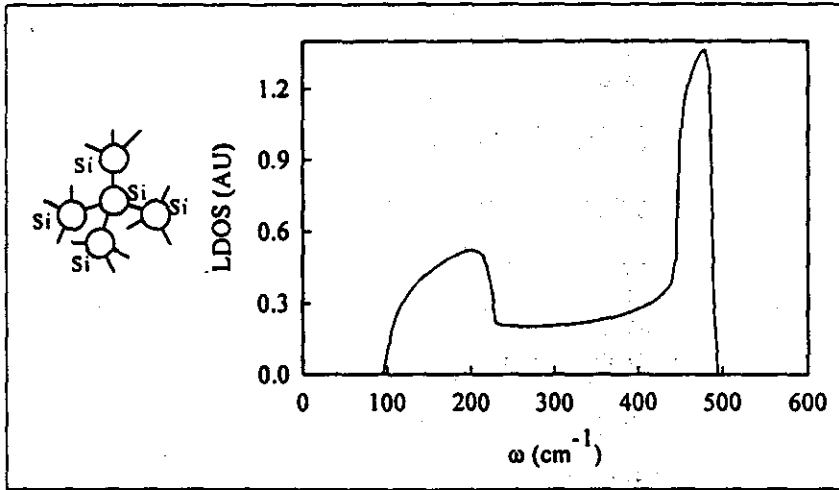
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Bahan murni (a-Si dan a-C)

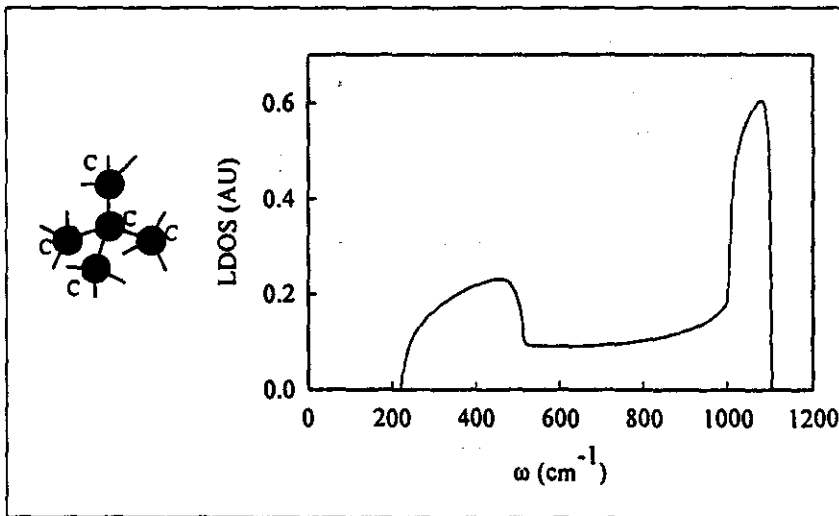
Untuk menjelaskan modus vibrasi pada a-Si:H dan a-C:H, akan dibahas keadaan vibrasi yang ada pada a-Si dan a-C yang berfungsi sebagai jaringan induk

tempat meletakkan gugus dari struktur yang dibahas. Bahan a-Si dan a-C berperan sebagai sistem acuan saat menjelaskan perubahan struktur karena keberadaan atom-atom baru. Jadi gambaran yang teliti tentang sifat jaringan induk sangat penting untuk mengerti sifat struktur yang baru. Pengetahuan keadaan vibrasi sistem induk a-C dan a-Si murni merupakan syarat yang penting untuk mengerti sifat keadaan vibrasi tambahan yang disebabkan atom-atom baru.

Pada perhitungan kerapatan keadaan lokal, gugus yang digunakan adalah struktur tetrahedral yang semua atom penyusunnya adalah Si atau C. Dari hasil perhitungan didapat kurva kerapatan keadaan fonon limbak. Kurva ini diperlihatkan di Gambar 2 dan Gambar 3. Pada kedua gambar, pada masing-masing hanya terdapat dua modus getaran. Hasil ini sesuai dengan hasil perhitungan yang dilakukan oleh Thorpe (1973) dan Yndurain dan Sen (1976), dimana kedua modus di atas adalah modus lintang bak-optik dan bak-akustik. Sedangkan modus-modus bujur bak-akustik dan bak-optik tidak terlihat. Modus-modus vibrasi ini disebut dengan bak-akustik dan bak-optik disebabkan oleh perbedaan antara fonon optik dan akustik tidak dapat didefinisikan dengan jelas dalam bahan tanpa periodisitas (Laughlin dan Joannopoulos 1978). Penggunaan istilah optik dan akustik di kasus amorf hanya untuk membedakan daerah-daerah modus vibrasi.



Gambar 2. Kerapatan keadaan lokal di atom Si(—) dalam a-Si.



Gambar 3. Kerapatan keadaan lokal di atom C(—) dalam a-C.

Kerapatan keadaan untuk bahan amorf yang dihitung dengan menggunakan gugus ukuran kecil oleh Thorpe (1973), tidak memberikan gambaran modus bujur. Tetapi modus ini terlihat pada perhitungan menggunakan gugus dengan ukuran yang lebih besar, dimana atom-atom yang berikatan membentuk ikatan seperti cincin (Thorpe 1973). Pada kristal modus-modus bujur berasal dari hubungan rentang jauh. Oleh karena itu cukup beralasan jika dinyatakan bahwa modus-modus bujur tidak tampak karena hubungan rentang jauh berupa statistik cincin dan hubungan rentang menengah tidak dimasukkan pada perhitungan.

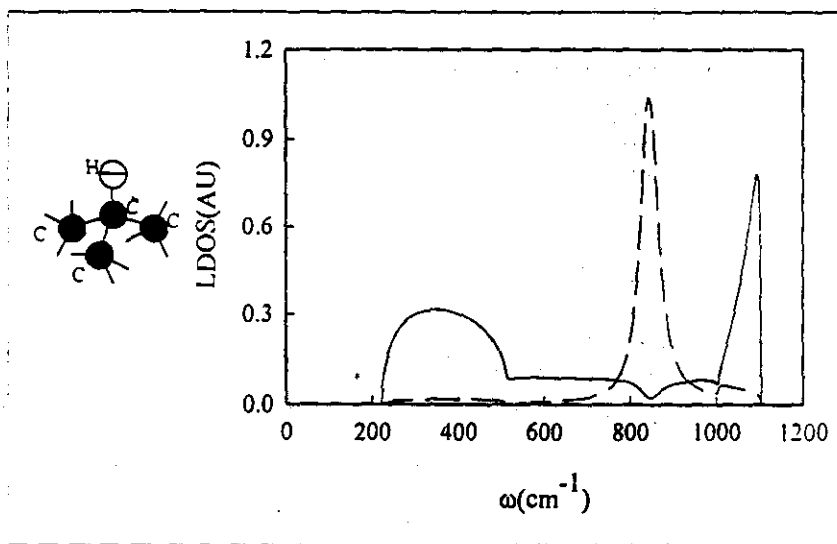
Modus lintang bak-akustik pada a-Si diperlihatkan di Gambar 2 dan a-C di Gambar 3 berturut-turut pada frekuensi 200 cm^{-1} dan 455 cm^{-1} , sedangkan modus lintang bak-optik pada kedua bahan tersebut berturut-turut pada frekuensi 480 cm^{-1} untuk a-Si dan 1080 cm^{-1} untuk a-C. Hasil ini mendekati hasil eksperimen untuk modus-modus vibrasi tersebut. Modus lintang bak-optik terdapat pada frekuensi 480 cm^{-1} untuk a-Si dan 1079 cm^{-1} untuk a-C, sedangkan modus lintang bak-akustik pada 195 cm^{-1} untuk a-Si dan 425 cm^{-1} untuk a-C (Agrawal dkk. 1989).

Pada kerapatan keadaan kedua bahan ini, ada beberapa daerah frekuensi yang tidak terdapat keadaan vibrasi. Daerah-daerah tersebut adalah daerah frekuensi lebih dari frekuensi maksimum yaitu sekitar 490 cm^{-1} untuk a-Si dan 1100 cm^{-1} untuk a-C dan di dekat frekuensi nol yaitu berupa sela dari 0 cm^{-1} sampai 95 cm^{-1} untuk a-Si dan dari 0 cm^{-1} sampai 219 cm^{-1} untuk a-C.

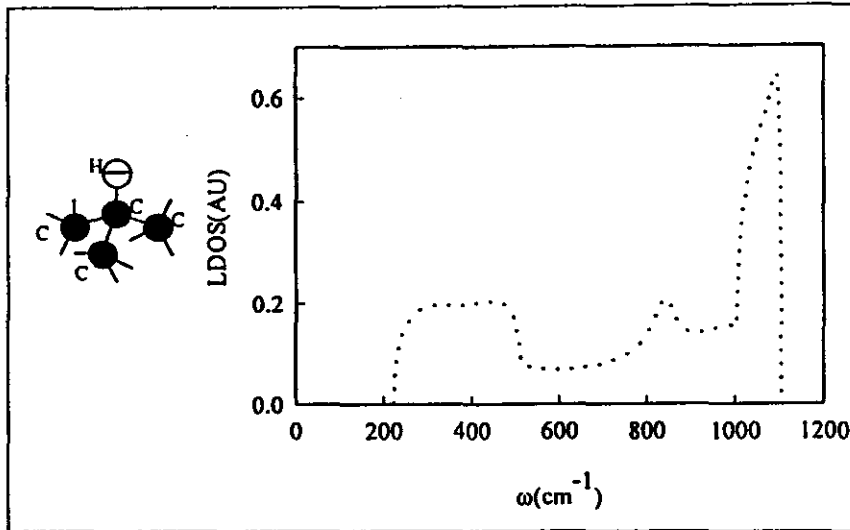
Kerapatan keadaan fonon limbak kedua bahan ini tidak memperlihatkan adanya singularitas Van Hove. Tidak adanya singularitas Van Hove pada bahan amorf cukup beralasan. Alasannya adalah karena pada bahan amorf tidak ada periodisitas, sedangkan singularitas ini disebabkan oleh adanya periodisitas. Jadi singularitas ini harus tidak ada pada bahan semikonduktor amorf. Sehingga dapat dikatakan bahwa metode ini merupakan pendekatan yang cukup baik untuk kasus amorf.

b. Amorf karbon terhidrogenisasi

Gambar 4 dan Gambar 5 memperlihatkan kerapatan keadaan lokal yang dihitung pada atom di gugus dengan atom pusat C. Atom pusat ini dikelilingi oleh tiga atom C dan satu H. Kerapatan keadaan di atom H dan atom C pusat diperlihatkan di Gambar 4, sedangkan Gambar 5 memperlihatkan kerapatan keadaan pada atom C terluar. Kerapatan keadaan lokal pada H memperlihatkan puncak yang cukup lebar di frekuensi 843 cm^{-1} . Puncak ini sesuai dengan yang didapatkan oleh Agrawal dkk. (1989) yang menghitung dengan menggunakan model potensial yang berbeda.



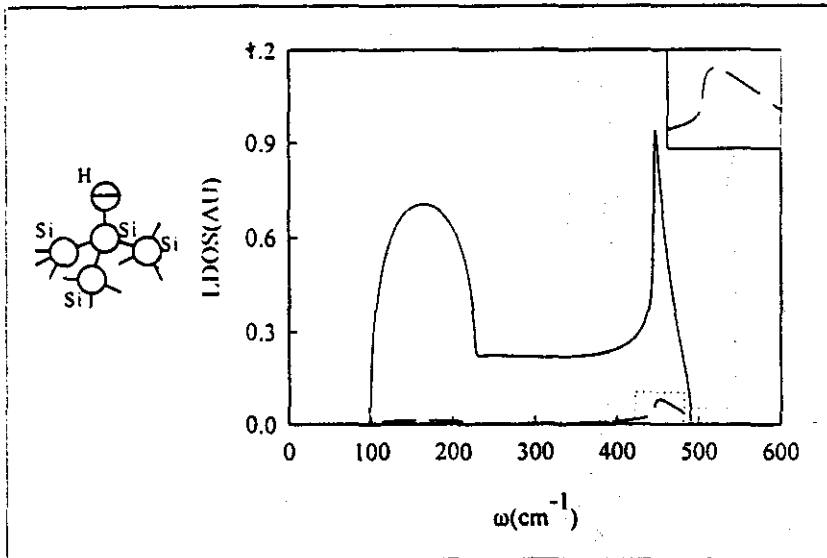
Gambar 4. Kerapatan keadaan lokal pada C(—) pusat dan H(---) di gugus dengan atom pusat C yang dikelilingi satu H dan tiga C dari a-C:H.



Gambar 5. Kerapatan keadaan lokal pada C(····) terluar di gugus dengan atom pusat C yang dikelilingi satu H dan tiga C dari a-C:H.

Pada kerapatan keadaan di atom C pusat, puncak di daerah lintang bak-optik dan bak-akustik berada di sekitar frekuensi 1096 cm^{-1} dan 346 cm^{-1} , serta terjadi lembah pada nilai kerapatan keadaan di sekitar frekuensi 843 cm^{-1} . Sedangkan untuk atom C terluar puncak di daerah lintang bak-optik dan bak-akustik berada di sekitar frekuensi 1094 cm^{-1} dan 446 cm^{-1} , juga terdapat suatu modulus vibrasi baru di sekitar frekuensi 843 cm^{-1} . Modulus vibrasi di 843 cm^{-1} ini bersesuaian dengan modulus vibrasi atom H di sekitar frekuensi yang sama.

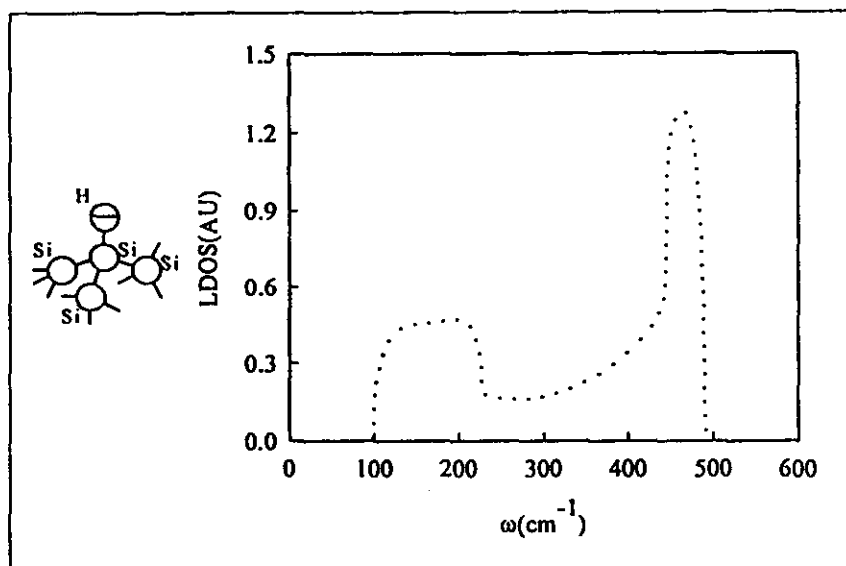
Jika kerapatan keadaan lokal pada atom C pusat dan atom C terluar dibandingkan dengan kerapatan keadaan fonon limbak a-C di Gambar 3, akan terlihat beberapa perbedaan. Modus di daerah lintang bak-optik dan bak-akustik pada atom C pusat dan pada C terluar dari gugus mengalami perubahan karena pengaruh atom H. Kerapatan keadaan lokal pada C terluar lebih mirip dengan kerapatan keadaan fonon limbak pada a-C.



Gambar 6. Kerapatan keadaan lokal pada Si(—) pusat dan H(---) di gugus dengan atom pusat Si yang dikelilingi tiga Si dan satu H dari a-Si:H.

c. Amorf silikon terhidrogenisasi

Kerapatan keadaan lokal yang dihitung dengan menggunakan gugus dengan atom pusat Si yang dikelilingi oleh tiga Si dan satu H, ditampilkan di Gambar 6 dan Gambar 7. Kerapatan keadaan lokal pada atom Si pusat dan pada atom H diperlihatkan di Gambar 6. Sedangkan kerapatan keadaan atom Si terluar diperlihatkan di Gambar 7. Hasil perhitungan kerapatan keadaan lokal ini serupa dengan yang didapatkan oleh Martinez dan Cardona (1983) yang menghitung dengan menggunakan model energi potensial yang berbeda untuk daerah fonon limbak a-Si.



Gambar 7. Kerapatan keadaan lokal pada Si(\cdots) terluar di gugus dengan atom pusat Si yang dikelilingi tiga Si dan satu H dari a-Si:H.

Keberadaan atom H menyebabkan perubahan kerapatan keadaan lokal pada Si terluar dan atom Si pusat jika dibandingkan dengan kerapatan keadaan fonon limbak Si di a-Si yang diperlihatkan di Gambar 2. Perubahan kerapatan keadaan untuk atom Si pusat, berupa perbesaran kerapatan di daerah sekitar 100 cm^{-1} sampai 440 cm^{-1} , dan pengurangan pada daerah frekuensi yang lain, juga terjadi pergeseran posisi modus-modus vibrasi yang ada. Modus vibrasi di daerah lintang bak-optik dan lintang bak-akustik berturut-turut berada di sekitar frekuensi 447 cm^{-1} dan 165 cm^{-1} , seperti terlihat di Gambar 6. Sedangkan perubahan untuk atom Si terluar berupa pengurangan besar kerapatan keadaan dan pergeseran modus-modus vibrasi yang ada. Modus vibrasi di daerah lintang bak-optik dan lintang bak-akustik berturut-turut berada di sekitar frekuensi 465 cm^{-1} dan 198 cm^{-1} , seperti terlihat di Gambar 7.

Dari hasil perbandingan kerapatan keadaan lokal pada Si yang merupakan atom pusat dengan Si terluar di gugus terlihat bahwa ada perbedaan di antara kedua kerapatan keadaan. Kerapatan keadaan lokal pada Si terluar lebih mirip dengan kerapatan keadaan fonon limbak di a-Si, tetapi mengalami sedikit pergeseran posisi modus vibrasi dan pengurangan nilai kerapatan keadaan lokal. Sedangkan kerapatan keadaan pada Si yang merupakan atom pusat menjadi semakin berbeda dari kerapatan keadaan fonon limbak di a-Si yang diperlihatkan di Gambar 2.

IV. KESIMPULAN

Kekisi Bethe mempermudah penelitian tentang pengaruh lingkungan lokal pada sifat vibrasi di bahan amorf. Kekisi Bethe dibuat dengan menggunakan model Born dan konfigurasi tetrahedral, dan dapat digunakan untuk menganalisa modus-modus vibrasi pada bahan amorf, dan mengetahui perbandingan kerapatan keadaan lokal pada atom-atom di bahan a-Si, a-C, a-C:H, a-Si:H. Dari perbandingan ini terlihat bahwa kerapatan keadaan lokal pada suatu atom sangat terpengaruh oleh lingkungan lokal di sekitarnya. Keberadaan atom H mempengaruhi kerapatan keadaan lokal pada atom-atom di sekitarnya. Pengaruh terbesar, terlihat pada kerapatan keadaan lokal di atom yang merupakan tetangga terdekat atom H.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Studi ini terlaksana atas dukungan program URGE dan German-Indonesia Corporation Program of the BMBF (INT-KFA Jülich).

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, Bal K., Yadav, P. S., dan Ghosh, B. K., 1989. Vibrational excitations in a-Si_{1-x}C_x:H alloys, *Physical Review B*, 39, 11: 7876-7880.
- Brodsky, M. H., Cardona, Manuel, dan Cuomo, J. J., 1977. Infrared and Raman spectra of the silicon-hydrogen bonds in amorphous silicon prepared by glow discharge and sputtering, *Physical Review B*, 16, 3556-3571.

- Bruggemann, R., Main, C., dan Bauer, G. H., 1993. Some aspects of the role of holes in the transient response of a-Si:H pin-diodes, *Journal of noncrystalline solid*, 164-166:663-666.
- Laughlin, R.B., Joannopoulos, J.D., 1978. Theory of surface phonon in amorphous silica, *Physical Review B*, 17,12: 4922-4930.
- Martinez, E., dan Cardona, Manuel, 1983. Vibrational spectra of a-Si:H, a-Si:F, a-Ge:F: Bethe-lattice calculation, *Physical Review B*, 28, 2: 880-888.
- Martinez, E., dan Yndurain, Felix, 1982. Theoretical study of intrinsic surface phonon in hydrogenated amorphous silicon, *Solid State Communication*, 44, 11: 1477-1480.
- Nagle J. F., Bonner J. C., dan Thorpe M. F., 1972. Cycle-free approximation to amorphous semiconductors, *Physical Review B*, 5, 6: 2233-2241.
- Pollard, W. B. dan Joannopoulos, J. D., 1978. Excitations in amorphous pyramidally bonded solids. I. Electrons, *Physical Review B*, 17, 4: 1770-1784.
- Street, R. A., 1993. Physics of a-Si:H p-i-n devices, *Journal of noncrystalline solid*, 164-166:643-652.
- Thorpe, M. F., 1973. Effect of local order on phonon density of states, *Physical Review B*, 8, 12: 5352-5356.
- Thorpe, M. F., dan Weaire D., 1971. Electronic properties of an amorphous solid. II. Further aspects of theory, *Physical Review B*, 4, 10: 3518-3526.
- Yndurain, Felix, N. Sen, Pabitra, 1976. Effects of the local configuration on the lattice dynamics of group-IV semiconductors, *Physical Review B*, 14, 2: 531-537.