

参考文献

- [1]P. J. Dean, E. C. Lightowers and D. R. Wight, *Phys. Rev.*, **140**, A352, (1965).
- [2]G. Peckham, *Solid State Commun.*, **5**, 311-313, (1967).
- [3]J. L. Warren, J. L. Yarnell, G. Dolling and R. A. Cowley, *Phys. Rev.*, **158**(3), 805, (1967).
- [4]H. Sternschulte, K. Thonke and R. Sauer, *Phys. Stat. Sol. (a)* **172**, 37, (1999).
- [5]H. Sternschulte, S. Wahl, K. Thonke, R. Sauer, M. Dalmer, C. Ronning and H. Hofsass, *Appl. Phys. Lett.*, **71** (18), 2668, (1997).
- [6]L. H. Robins, E. N. Farabaugh and A. Feldman, *Physical Rev. B*, **48**(19), 14167, (1993).
- [7]Y. P. Varshni, *Physica*, **34**, 149, (1967).
- [8]N. F. Mott, *Phil. Mag.*, **6**, 287, (1961).
- [9]P. P. Edwards and M. J. Sienko, *Phys. Rev. B*, **17**(6), 2575, (1978).
- [10]R. C. Casella, *J. Phys. Chem. Solids*, **24**, 19, (1963).
- [11]C. C. Klein, *J. Appl. Phys.*, **39**, 2029, (1968).
- [12]K. Takiyama, M. I. Abd-Elrahman, T. Fujita and T. Oda, *Solid State Commun.*, **99**, 793, (1996).
- [13]J. R. Haynes, *Phys. Rev.Lett.*, **17**, 860, (1966).
- [14]M. O. Godzaev and B. E. Sernelius, *Phys. Rev. B*, **33**(12), 8568-8581, (1986).
- [15]R. C. Casella, *J. Phys. Chem. Solids*, **24**, 19, (1963).
- [16]K. Thonke, R. Schliesing, N. Teofilov, H. Zacharias, R. Sauer, A. M. Zaitsev and T. R. Anthony, 10th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides & Silicon Carbide, abstract book 12.4, (1999).
- [17]A. Yamaguchi, T. Tsutsumi, H. Hirayama, Satoshi Yamashita and H. Kawarada, 2nd International Conference on the Applications of Diamond Films and Related Materials, MYU, 751, (1993).
- [18]R. S. Knox, *Optics Communications*, **1**(1), 19, (1969).
- [19]A. Mysyrowicz, J. B. Grun, R. Levy, A. Bivas and S. Nikitine, *Phys. Lett.*, **26A**(12), 615, (1968).
- [20]H. Souma, T. Goto, T. Ohta and M. Ueta, *J. Phys. Soc. Jap.*, **29**(3), 697, (1970).
- [21]S. Jin, Y. Zheng and A. Li, *J. Appl. Phys.*, **82**(8), 3870, (1997).

- [22]J. E. Fouquet and A. E. Siegman, *Appl. Phys. Lett.*, **46**(3), 280, (1985).
- [23]Q. Fu, D. Lee, A. Mysyrowicz, A. V. Nurmikko, R. L. Gunshor and L. A. Kolodziejski, *Phys. Rev. B*, **37**(15), 8791, (1988).
- [24]M. Sugawara, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**(1A), 124, (1996).
- [25]C. Benoit A La Guillaume, F. Salvan and M. Voos, *J. Lumine.*, **1-2**, 315, (1970).
- [26]E. Hanamura, *J. Phys. Soc. Japan*, **29**, 50, (1970).
- [27]Y. E. Pokrovskii and K. I. Svistunova, *Soviet Physics-JETP Letters*, **13**, 212, (1971).
- [28]D. C. Reynolds and T. C. Collins, *Excitons Their Properties and Uses*, Academic Press, pp.42-57, (1981).
- [29]Ya. E. Pokrovskii and K. I. Svistunova, *Soviet Physics- Semiconductors*, **4**(3), 409, (1970).
- [30]A. Einstein, *Absitz. Pr. Akad. Wiss. Berlin Kl. Phys. Math.*, **22**, 261, (1924).
- [31]G. P. Collins, *Physics Today*, **48**(8), 17, (1995).
- [32]後藤武生, 申猛燕, *固体物理*, **33**(3), 190, (1998).
- [33]D. W. Snoke and J. P. Wolfe, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(21), 2543, (1990).
- [34]D. W. Snoke and J. P. Wolfe, *Phys. Rev. B*, **41**(16), 11171, (1990).
- [35]J. L. Lin and J. P. Wolfe, *Phys. Rev. Lett.*, **71**(8), 1222, (1993).
- [36]M. Hasuno, N. Nagasawa, T. Itoh and A. Mysyrowicz, *Phys. Rev. Lett.*, **(9)**, 1303, (1993).

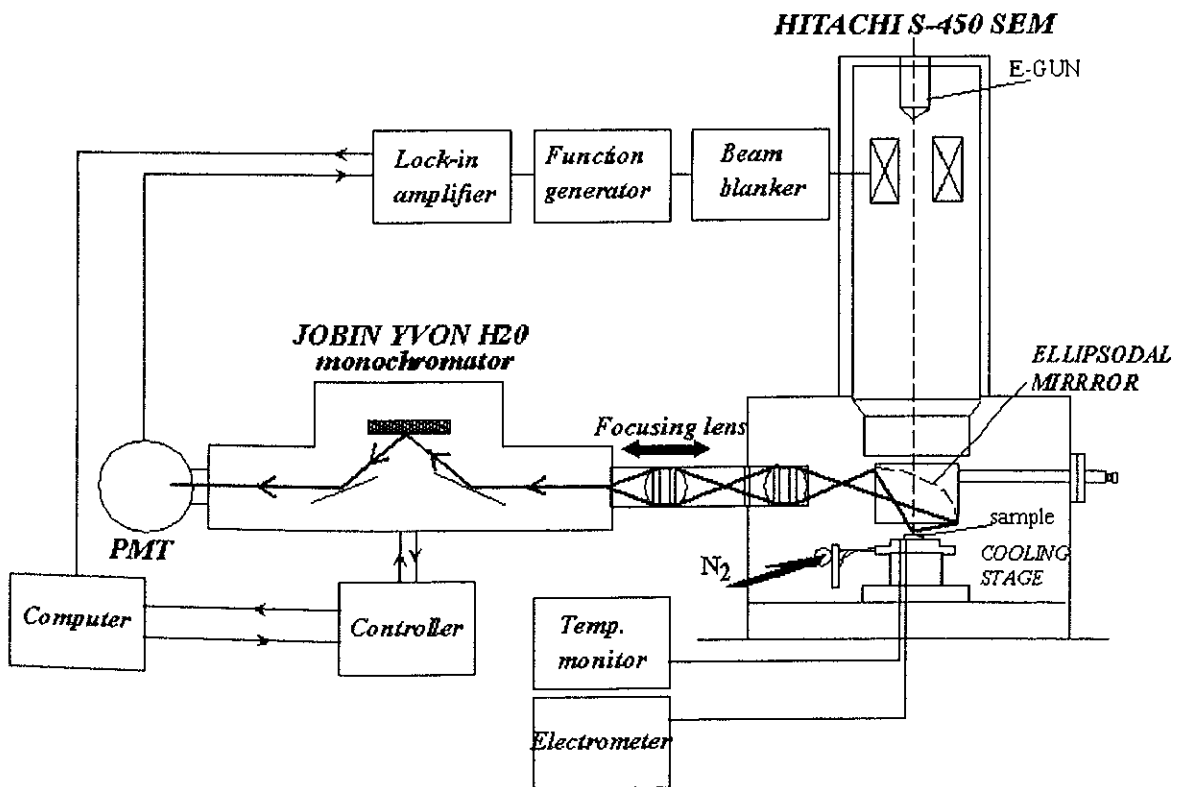
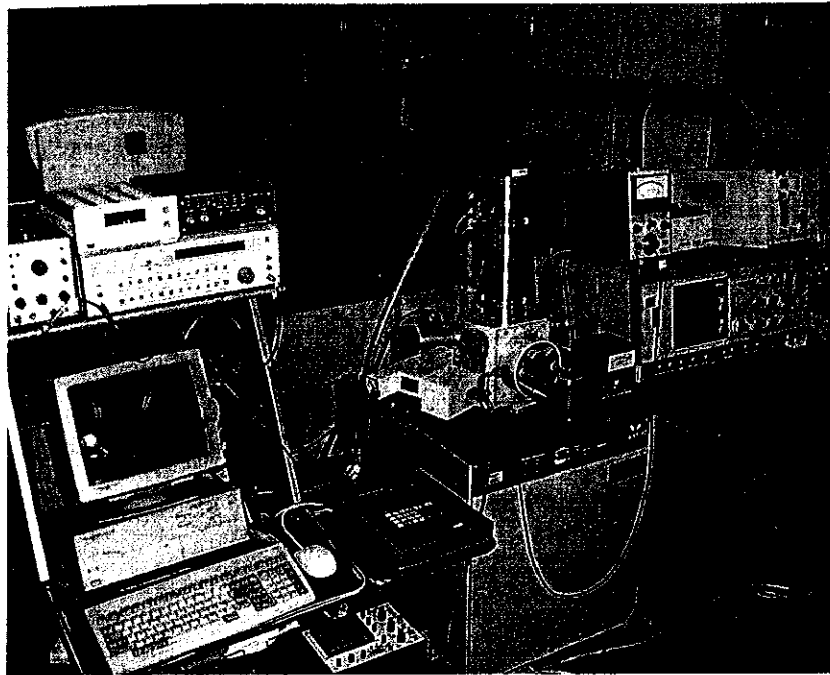


図 6.1 紫外光領域観察用 CL 測定装置とその概略図。

Table.1 CL測定条件および測定環境。

励起源	HITACHI S-450 走査型電子顕微鏡	
	フィラメント	プリセンタードヘアピン型タングステン フィラメント
	加速電圧	2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30 kV
	プローブ電流	1 nA— 100 μ A
	電子ビーム変調周波数	2000 Hz
分光系	Jobin Yvon H20 モノクロメーター	
	グレーティング	300 grooves/mm, 250 nm blaze
	逆分散	2.4 nm/mm
	スリット	0.5 mm
検出系	HAMAMATSU R955-07 サイドオン型光電子増倍管。	
	感度特性	160 nm—900 nm
	PMT 駆動電圧	-900 V
制御及びデータ 処理系	NEC PC-9800(データ処理), ATAGO MIC 11(分光器制御)	
試料冷却系	液体窒素冷却ステージ	
	試料温度	120 K—300 K

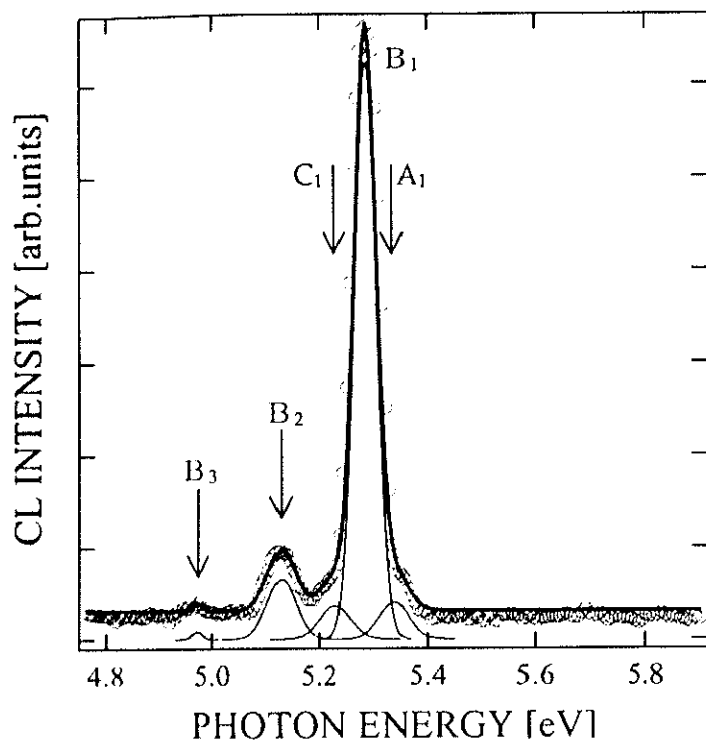


図 6.2 極低 CH₄(CH₄/H₂=0.025%)濃度により合成したホモエピタキシャルダイヤモンド薄膜からのエキシトン発光スペクトル。
試料温度は 40 K、電子ビーム加速電圧 10 kV。白丸は、実測値を示し、実線は、いくつかのピークでの Gaussian フィッティングの結果を示す。

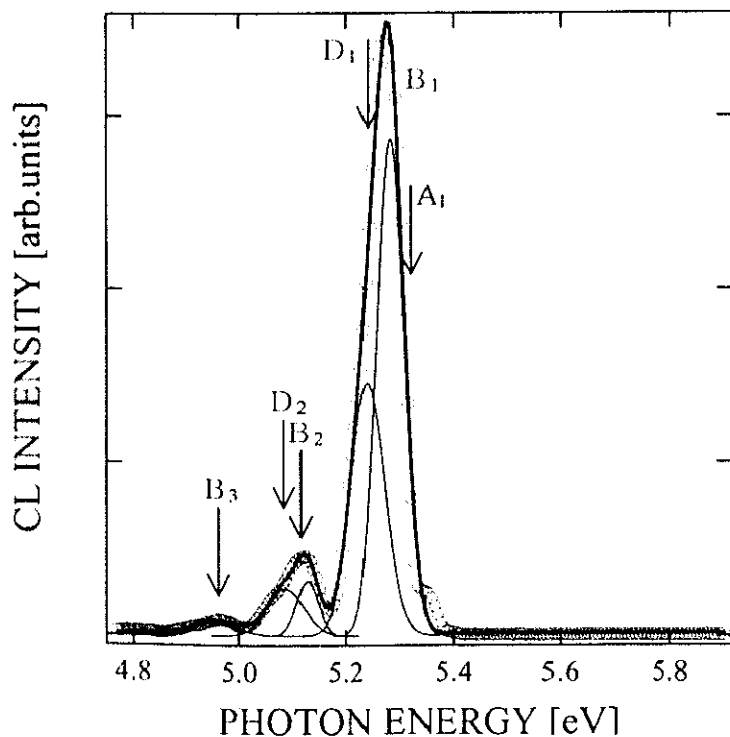


図 6.3 高圧高温合成法により合成した高純度 IIa 型ダイヤモンドからのエキシトン発光スペクトル。
試料温度は 40 K、電子ビーム加速電圧 10 kV。白丸は、実測値を示し、実線は、いくつかのピークでの gaussian フィッティングの結果を示す。
ここでは、B₁ より低エネルギー側をフィットした。

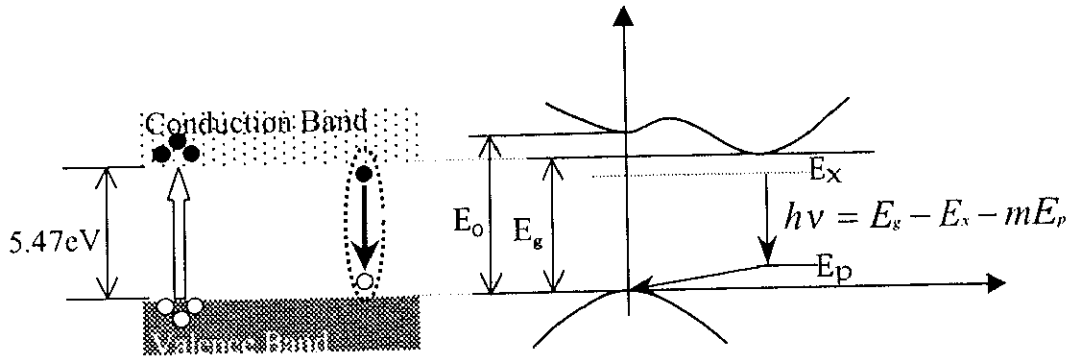
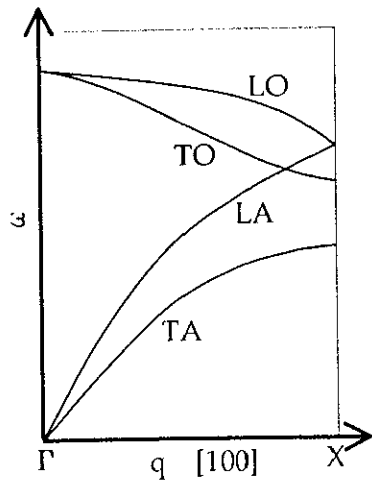


図 6.4 間接エキシトンの再結合発光過程の模式図。

E_0 : 直接バンドギャップ; E_g : 間接バンドギャップ; E_x : エキシトン束縛エネルギー; $h\nu$: フォトンエネルギー; E_p : フォノンエネルギー; m : 遷移あたりに放出されるフォノンの数



Parameter	Phonon Energy
E_{TO}	0.141 ± 0.001 eV
E_{LO}, E_{LA}	0.163 ± 0.001 eV
E_{TA}	0.087 ± 0.002 eV

TO: Transverse-Optical
 LO: Longitudinal-Optical
 LA: Longitudinal-Acoustical
 TA: Transverse-Acoustical

図 6.5 ダイヤモンドの分散関係の模式図と Dean *et al.*[1]により見積もられているフォノンエネルギー。

Table 2 極低 CH₄ 濃度合成ダイヤモンド薄膜と高圧高温合成 IIa 型ダイヤモンドのバンド端発光スペクトルの比較。

	観察発光ピーク位置		ピークの種別	
	極低 CH ₄ 濃度合成 ダイヤモンド薄膜	高圧高温合成 IIa 型 ダイヤモンド		
A ₁	5.33 eV	5.35 eV	5.323 eV	: Eg-Ex-E _{TA}
B ₁	5.28 eV	5.28 eV	5.269 eV	: Eg-Ex-E _{TO}
C ₁	5.23 eV	-	5.247 eV	: Eg-Ex-E _{LO}
B ₂	5.13 eV	5.12 eV	5.128 eV	: Eg-Ex-E _{TO} -E _{TO}
B ₃	4.97 eV	4.95 eV	4.987 eV	: Eg-Ex-E _{TO} -2E _{TO}
D ₁	-	5.24 eV	5.214 eV	: Eg-(Ex+ E _{BX})-E _{TO}
D ₂	-	5.08 eV	5.073 eV	: Eg-(Ex+ E _{BX})-E _{TO} -E _{TO}

Eg: 5.49 eV(間接バンドギャップ)、Ex: 0.08 eV(フリーエキシトンの束縛エネルギー)
 E_{BX}: 0.055 eV(フリーエキシトンとダイヤモンド格子位置に置換したボロン原子間の束縛エネルギー)

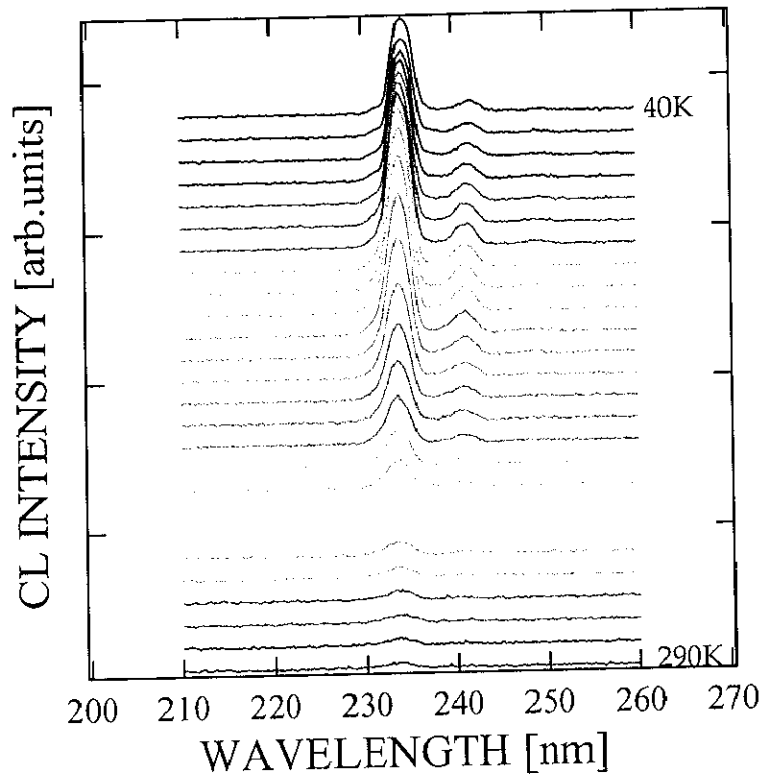


図 6.6 試料温度 40K から 290K における極低 CH₄ 濃度合成法によるダイヤモンド薄膜のバンド端発光スペクトル。

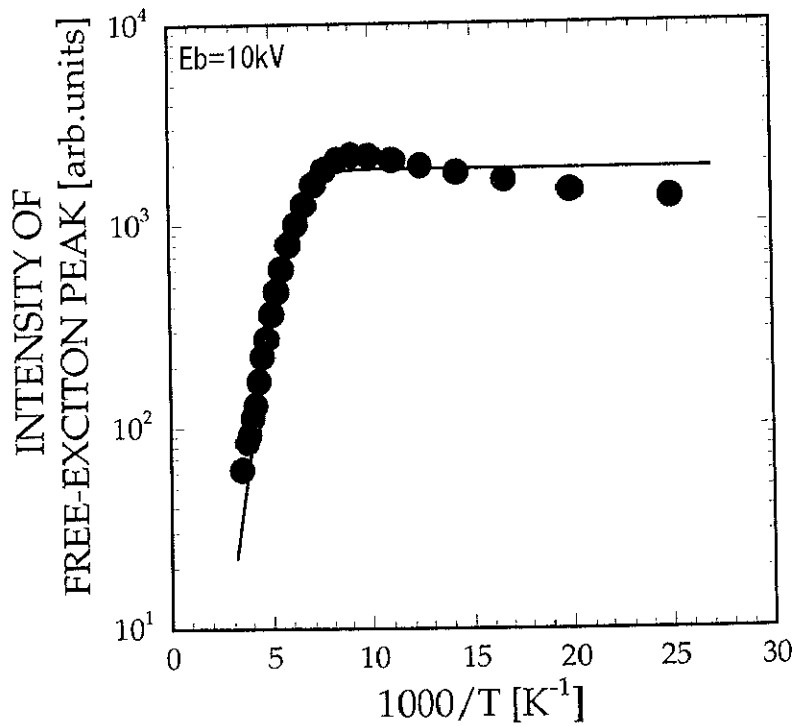


図 6.7 極低 CH₄ 濃度合成法によるダイヤモンド薄膜のフリーエキシトンピーク強度の温度依存性。
実線は第 5 章(1)式によりフィット。

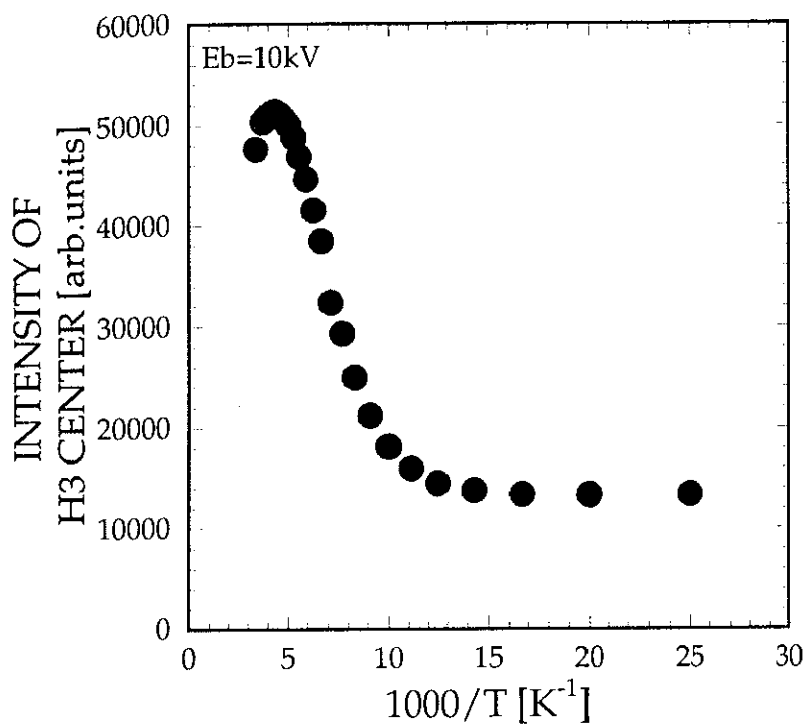


図 6.8 H3 センター発光ピーク強度の温度依存性。

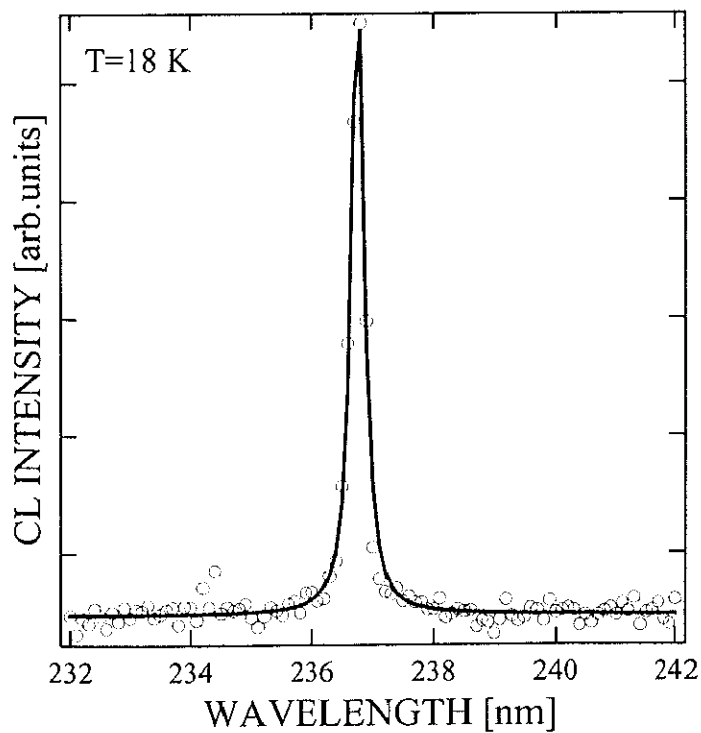


図 6.9 バンド端付近の高分解能低温 CL スペクトル。実線は Lorentzian 関数によりフィッティング。

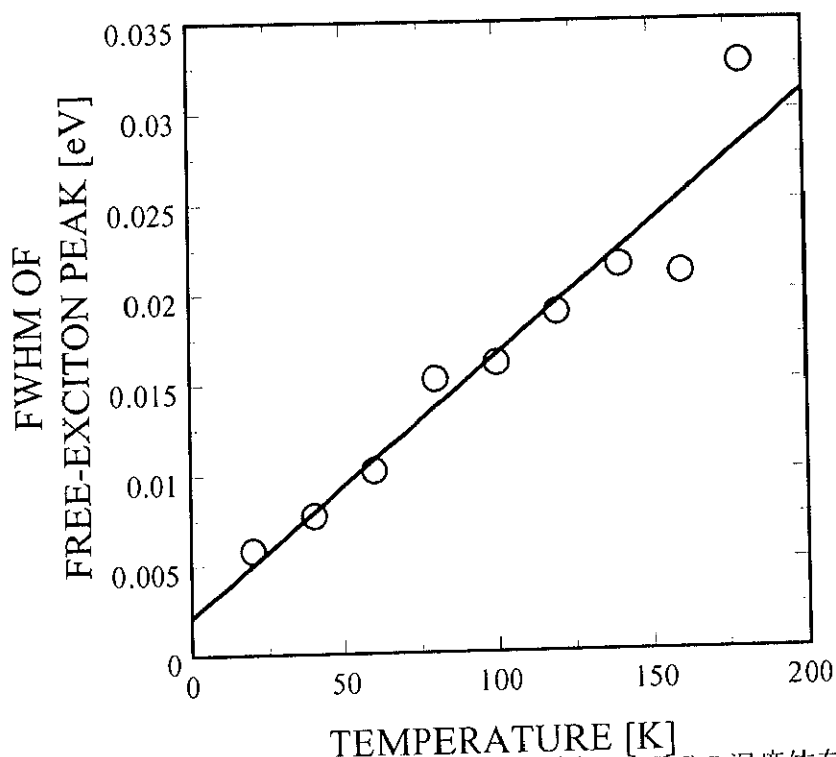


図 6.10 フリーエキシトンピーク半値幅(FWHM)の温度依存性。実線は(3)式によりフィット。

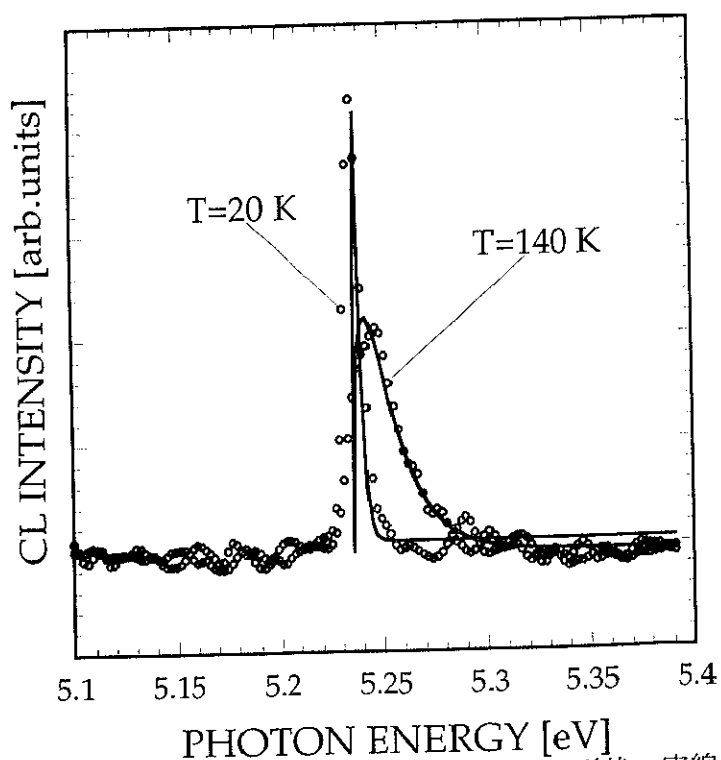


図 6.11 20K と 140K におけるエキシトンピークの形状。実線は(4)式によりフィッティング。

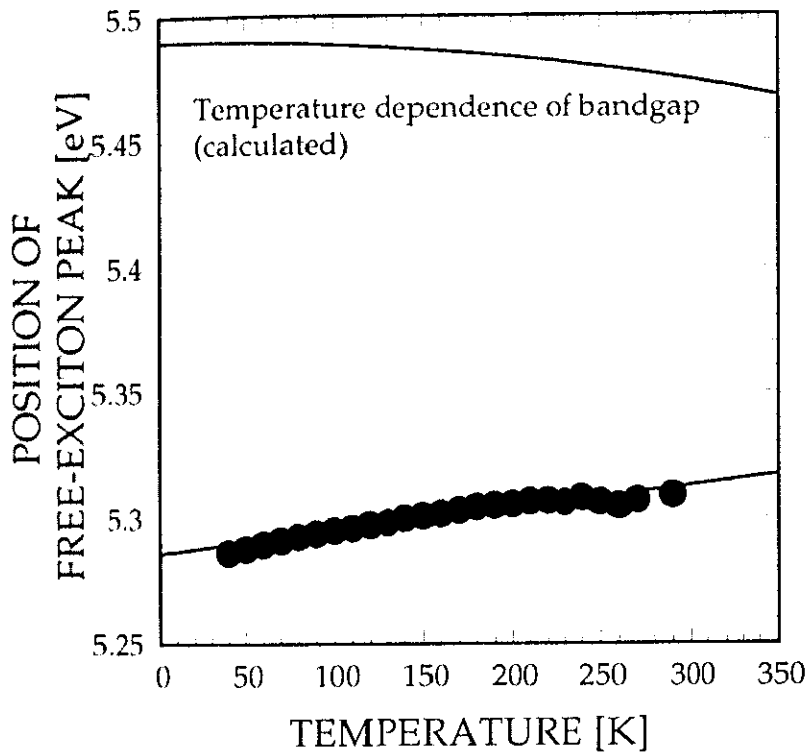


図6.12 試料温度40Kから290Kでの、極低 CH_4 濃度合成法により得られた薄膜のエキシトンピークポジションの温度依存性。エキシトンピークポジションは、各温度でのスペクトルをGaussian関数による分布形状の解析によって得られた。フリーエキシトンに対する実験値は黒丸で示した。その実験値は、最小二乗法によりフィットした。実験値の上方に示す実線は、バンドギャップの温度変化を示す。

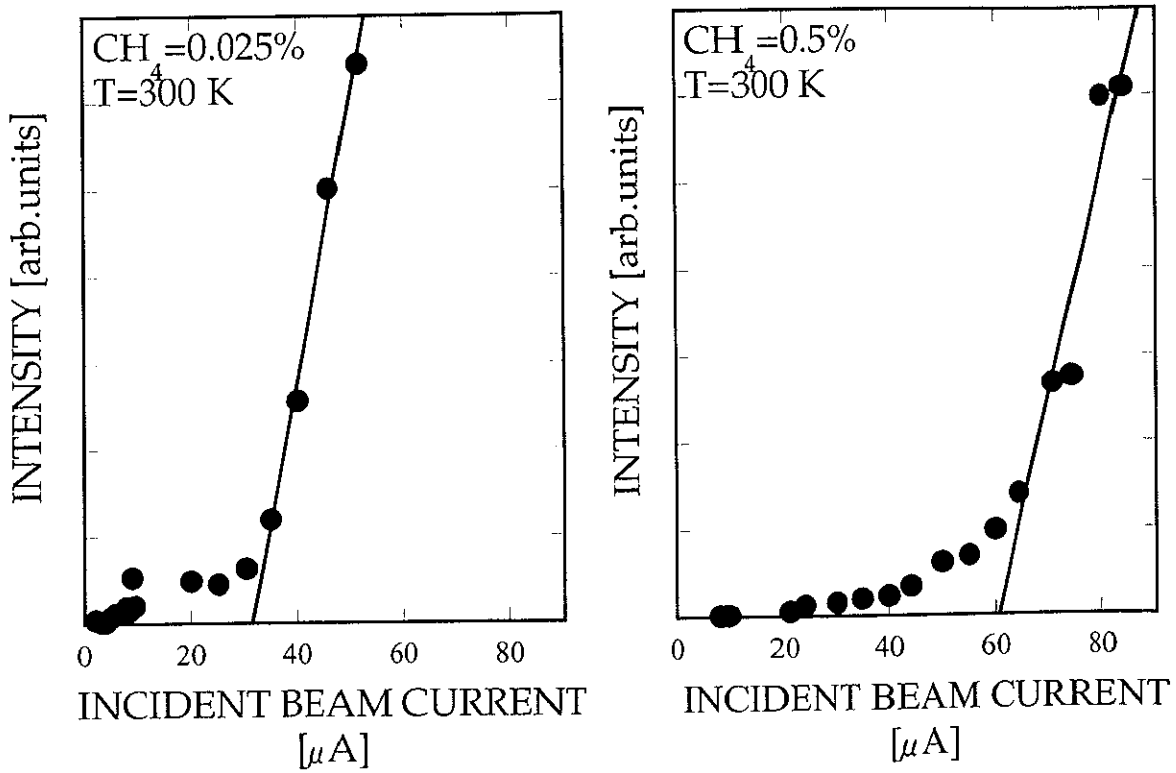


図 6.13 (a) 極低 CH₄ 濃度(CH₄=0.025%)合成法により得られた薄膜と(b)典型的な CH₄ 濃度(CH₄=0.5%)により得られた薄膜の励起電子ビームプローブ電流に対するエキシトン再結合発光強度の変化。観測温度は 300 K。励起加速電圧は 30 kV である。

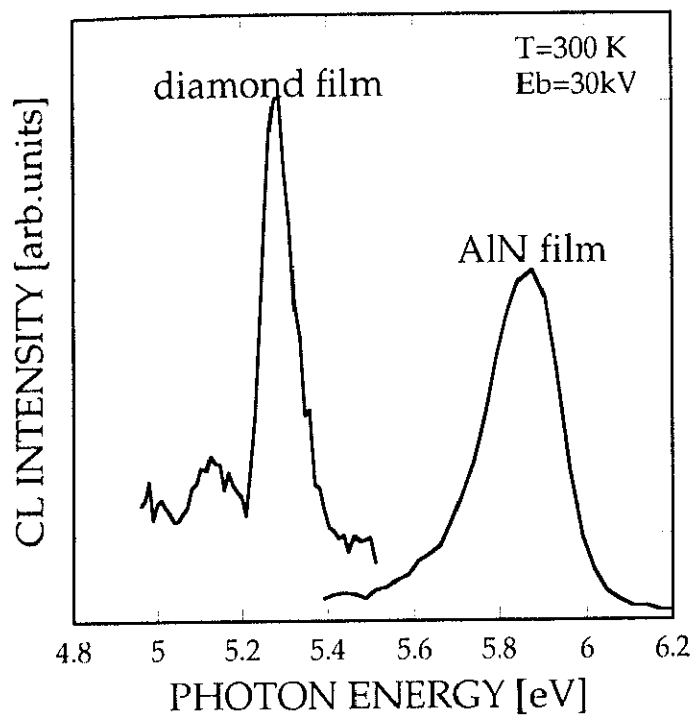


図 6.14 視測温度 300 K でのダイヤモンド薄膜と AlN 薄膜のバンド端スペクトル。

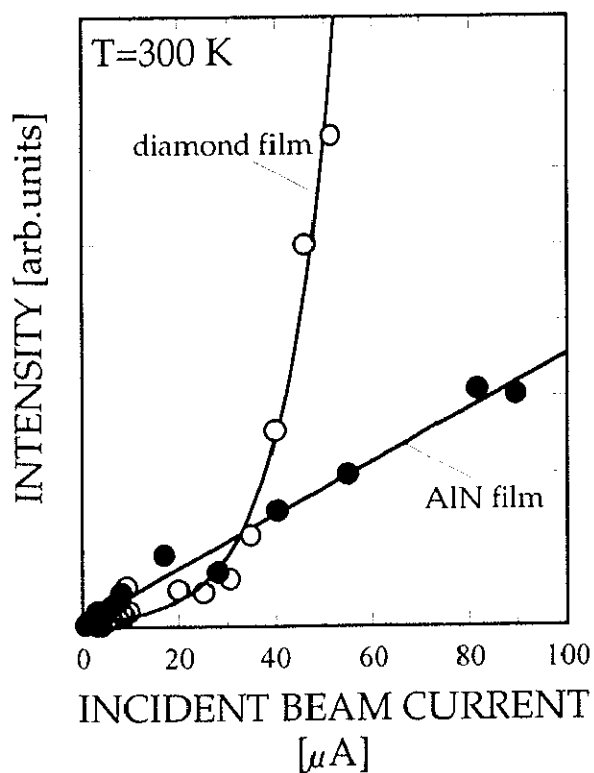


図 6.15 ダイヤモンド薄膜と AlN 薄膜に対する励起電子ビームのプロープ電流と発光強度の関係

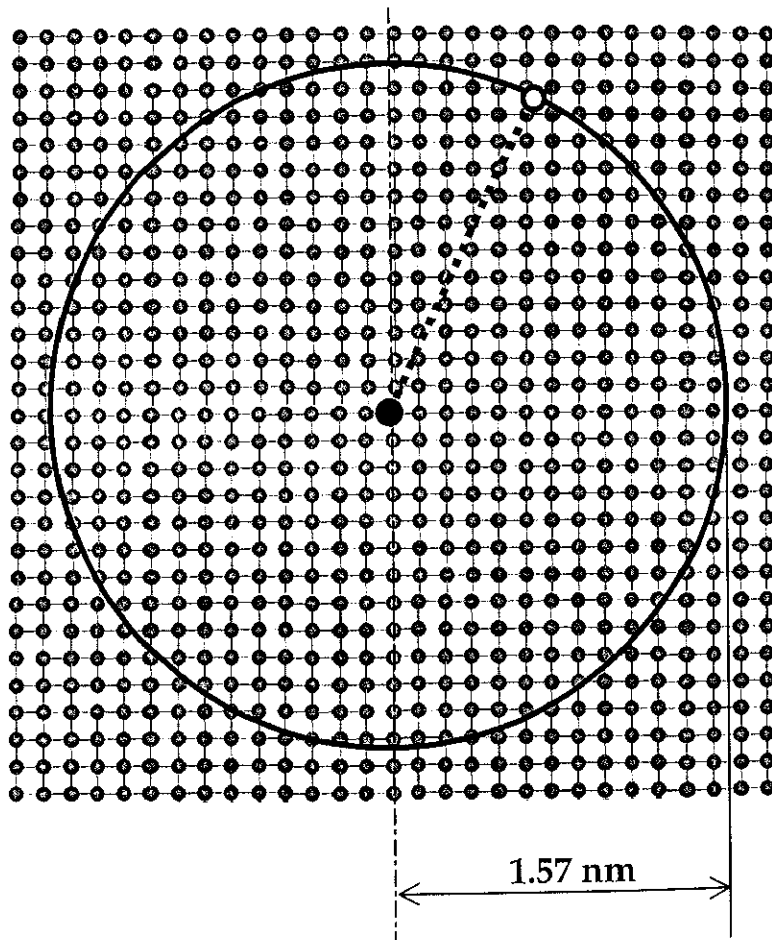


図 6.16 ダイヤモンド中のフリーエキシトンのイメージ図。
多くの点は、炭素原子。

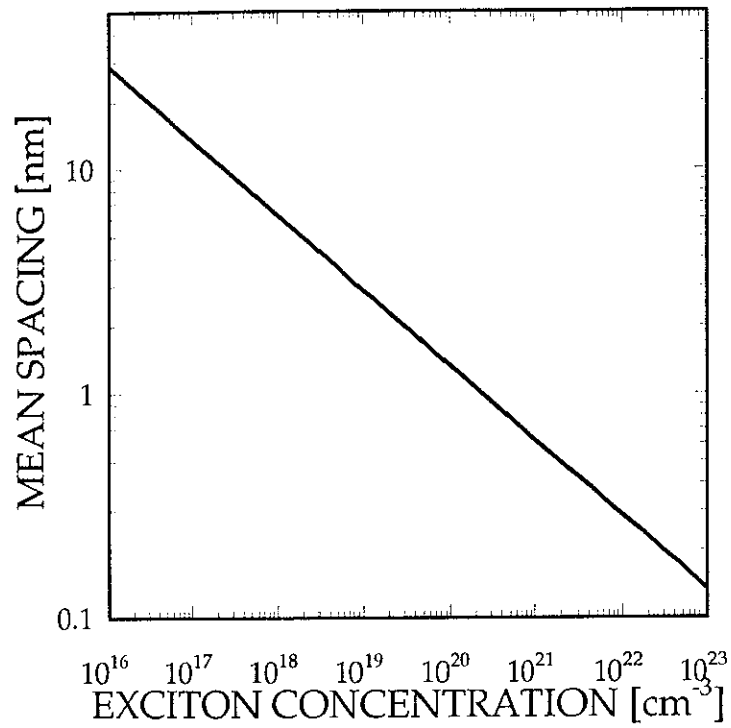


図 6.17 エキシトンの密度(n)とエキシトン間の平均距離(r)の関係。
エキシトンの軌道半径により占められるエキシトン体積の密度($4\pi r^3/3 = 1/n$)から見積もった。

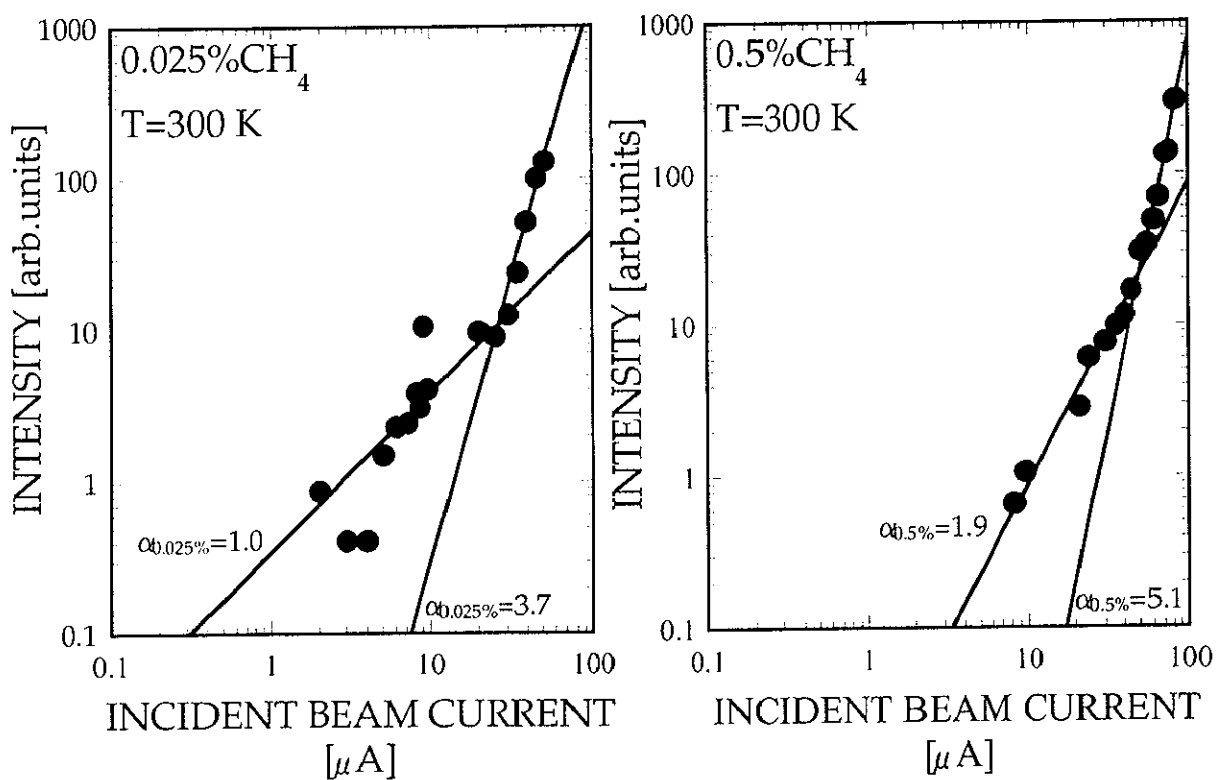


図 6.18 図 6.14 の対数スケール表示。
 観測温度 300 K での(a) 極低 CH₄ 濃度(CH₄=0.025%)合成法により得られた薄膜と(b)典型的な CH₄ 濃度(CH₄=0.5%)により得られた薄膜に対する励起電子ビームのプロープ電流とエキシトン発光強度の関係を示す。直線は(10)式によりフィット。

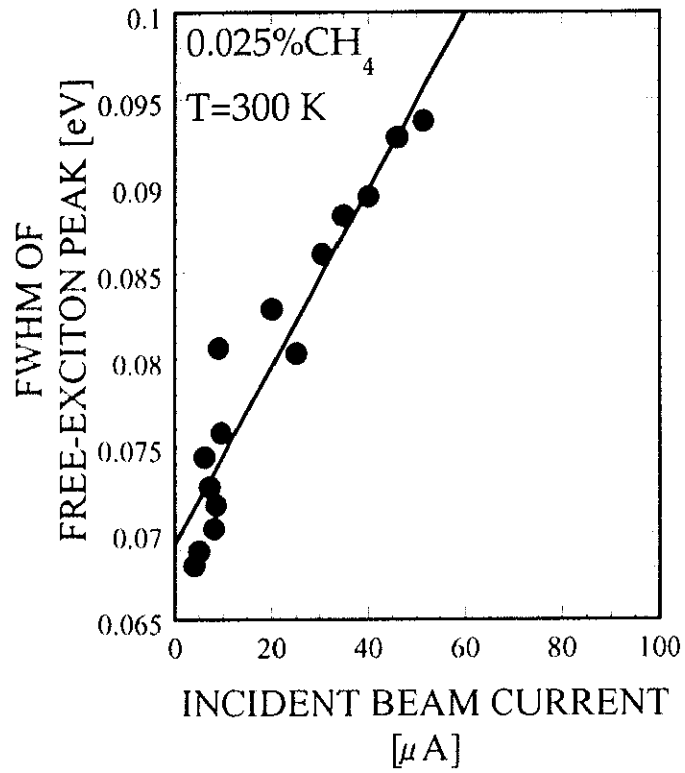


図 6.19 極低 CH₄ 濃度(CH₄=0.025%)合成法により得られた薄膜の励起プローブ電流に対する半値幅の変化。視測温度は 300 K。