分子分散ポリビニルカルバゾール EL 素子特性に及ぼすイオン分極効果

正員 伊東 栄次 (信州大学 工学部)
 学生員 山下 孝教 (信州大学 工学部)
 正員 宮入 圭一 (信州大学 工学部)

Effect of ionic charge polarization on device properties of the molecularly doped poly (N-vinylcarbazole) light emitting diode

Eiji Itoh, Member, Takanori Yamashita, Student-Member, Keiichi Miyairi, Member (Shinshu University)

The effect of heat-treatment and lithium perchlorate (LiClO_4) doping on the electrical and luminance properties of the poly (N-vinylcarbazole) film mixed with electron transporting material (BuPBD or Alq_3) and Coumarin6 was investigated in this study. It was found that the efficiencies of the light emitting diode with and without LiClO_4 were improved by heat-treatment in the vacuum. It was also found that the charge injection was enhanced by the small amount of LiClO_4 doping, and the luminance and the current density of the film with LiClO_4 were improved by the pre-biasing under the high electric field, and it was ascribed to the ionic charge polarization at the electrode/film interface.

キーワード: 分子分散ポリマー、EL 素子、イオンドーピング、イオン空間電荷分極、プレバイアス

1. まえがき

近年、ポリマー系有機電界発光 (EL) 素子は著しく寿命や効率が向上し、実用化への期待も高まっている^{1,7)}。蒸着により積層した低分子系と比較すると駆動電圧や輝度特性において劣る点はあるものの素子作製が塗布により簡便に行えるため、特に印刷による素子化やフォトリソ法によるマルチカラー化が確立されれば^{2,7,8)}、コスト面で極めて有利なディスプレイの製造が可能になると期待される。このうち、光あるいは電子機能性の低分子化合物を高分子中に分散させた分子分散ポリマー (Molecularly Doped Polymer: MDP) はすでに電子写真感光体の分野で実用化されているが、市販の有機化合物を混ぜるだけで様々な発光色や機能を得ることができることから有機 EL 素子の分野での実用化も検討されている。一方、MDP 膜は湿式プロセスで成膜するため溶剤やイオン性不純物等の混入を防ぐことは難しく、これが素子特性に与える影響は無視できないと考えられる。一般に、高分子材料の多くはそれ自体絶縁体であり MDP に使われるホスト材料も例外ではない。これまで、多くの高分子絶縁材料において電極界面近傍に蓄積したイオン性及び電子性キャリアによるヘテロもしくはホモ空間電荷による電界偏歪が高電界電気伝導や絶縁破壊現象に多大な影響を与えることが報告されているが^{9,10)}、有機 EL 素子のような超薄膜系においてその影響は一層大きくなると予想される。しかしながら、例えばイオン性の空間電荷の分布を意図的に制御可能であれば、空間電荷に起因した電界偏歪は実効的な障壁の高さの低下や電界強調による注入効率の増加を促すため、MDP を用いた有機 EL 素子の特性向上

が可能となると考えられる。そこで、本研究では MDP 系有機 EL 素子としてすでに報告例がある分子分散型ポリビニルカルバゾール薄膜^{2,7)} にイオン性不純物として LiClO_4 を少量 (1wt%) ドーピングした単層型有機 EL 素子を作製した。そして、有機層にプレバイアスを施して膜中においてイオン (Li^+ イオン及び ClO_4^- イオン) を空間電荷分極させることにより素子特性の向上を図ると共に、その安定性についても検討した。

2. 素子の作製方法

素子構造は ITO 下部電極 / MDP 層 / Al 上部電極とした。まず ITO 電極付ガラス基板を超音波洗浄した後で MDP 層をスピンコート法にて成膜した。膜厚は回転速度で制御され、およそ 80 から 150nm であった。そして、真空蒸着法にて Al 電極を蒸着して素子を作製した。電極面積は $0.2 \times 0.2 \text{ cm}^2$ である。図 1 と図 2 に本研究で使用した材料の分子構造及びエネルギー図 (文献値) を示す^{6,11,12)}。ポリビニルカルバゾール (PVCz) はホスト材料及び正孔輸送材料として使用した。クマリン 6 (Coumarin6 (C6)) は緑色の蛍光を示し、今回は発光中心として用いた。また、本研究では電子輸送材料としてアルミキノリノール錯体 (Alq_3) 及びオキサジアゾール誘導体 (BuPBD) の 2 種類を使用し、それぞれについてイオン性不純物である LiClO_4 の有無による違いを検討した。A 及び B 溶液においては Alq_3 を電子輸送材料及び発光材料とし、C 及び D 溶液では BuPBD を電子輸送材料として用いた。

これらの展開溶液の成分比を表 1 に示す。なお、溶媒は

図1 本研究で使った材料の分子構造
Fig. 1 Chemical structure of molecules used in this study.

図2 使用した材料のエネルギー図 (文献値)
Fig. 2 Energy diagram of molecules.

基本的にはクロロホルムを用いており、その体積は 10ml である。なお、 LiClO_4 はクロロホルムに難溶性であるがメタノールなどにはよく解けるため、B 及び D 溶液は 10g/l の LiClO_4 メタノール溶液を必要分だけ加えて作製した。

表1 展開溶液に用いた材料 (単位は mg)

Table 1 Components of materials used in this study.

	PVCz	Alq ₃	BuPB D	C6	LiClO_4
A	90	40	0	1.6	0
B	90	40	0	1.6	1.33
C	90	0	45	1.6	0
D	90	0	45	1.6	1.38

3. 実験方法

電流密度-電圧 (I-V) 特性及び輝度-電圧 (L-V) 特性の測定は真空中で 10 分間の熱処理 (80℃ もしくは 100℃) を行った後、真空を維持したまま 30℃ まで直ちに冷却して行った。昇温・冷却にはペルチェ素子を用いた。なお、I-V 及び L-V

図3 A 及び B 溶液から作製した ITO/MDP (100nm)/Al 素子の熱処理前後における I-V 及び L-V 特性
Fig. 3 I-V and L-V curves of device A and device B (ITO/MDP (100nm)/Al) before and after heat treatment.

測定は下部電極である ITO 電極側に正電圧を加えた場合を正バイアスとし、三角波電圧 (10mHz) の正側の半周期のみをバイアスして行った。輝度はフォトダイオードで観測した光電流を測定し、それを換算して輝度を算出した。熱処理の効果は熱処理前後の特性の違いから検討した。さらに、可動イオンの影響と分極条件を検討するために数 MV/cm オーダーのステップ電圧 (600 秒間) を正負交互に印加 (プレバイアス) して電流密度-時間 (I-t) 特性の測定を行うと共に、各 I-t 特性測定のために 10mHz の三角波 (正側半周期) を加えることによる、I-V 測定を行いプレバイアス効果の検討を行った。

4. 実験結果と考察

図3は Alq_3 を電子輸送材料とした展開溶液 A (LiClO_4 無) と展開溶液 B (LiClO_4 有) から作製した共に膜厚約 100nm の素子の I-V 及び L-V 特性を比較したものである。なお、同図は試料を真空に引いた直後の結果と、同試料を一度真空中にて加熱処理 (80℃・10 分間) を行い室温に戻した後の結果についても比較している。図から、熱処理後の結果について LiClO_4 の有無の効果と比較すると例えば 10cd/m² の発光を得るに必要な電圧が 28V から 20V と約 30% も減少しており、わずか 1wt% の LiClO_4 ドーピングが駆動電圧の低減に寄与することがわかる。また、いずれの試料においても熱処理を行うことにより輝度及び電流密度の向上が見られている。これは、成膜時の残留溶媒や水などの不要な吸着物質

が熱処理によって除去できたためと思われる。同じような熱処理の効果は、展開溶液 C (LiClO_4 無) 及び展開溶液 D (LiClO_4 有) から作製した素子においても得られた。ただし、展開溶液 D から作製した試料では、熱処理すると電流密度は半分以上に減少するが輝度の方は逆に増加し、効率の大幅な向上が見られた。すなわち、本研究で用いた MDP 膜の EL 素子特性においては、熱処理が効果的であると考えられる。従って、以後の実験は全て一度熱処理を行った試料について議論していくこととした。

図 4 に展開溶液 A と展開溶液 B から作製した素子について三角波のうち正側の半周期分のみを 3 回繰り返した際の I-V 及び L-V 特性とその変化を示す。いずれの場合も LiClO_4 ドーピングによる低電圧化が現れている。また、A の素子においてはスキャン回数を増すに従い、電流密度及び輝度が減少しているが、逆に B の素子においてはスキャン回数を増すに従い、電流密度及び輝度が向上しているのに加え、I-V 及び L-V 特性の両方にヒステリシスが見られた。すなわち、三角波の電圧上昇時に比べて下降時の方が電流・輝度共に大きくなる傾向がある。なお、図には示していないが、スキャン回数に伴う電流と輝度の上昇は電界強度や温度と共に顕著となり、熱処理を施すと再び元の状態に戻る傾向にある。そして、逆バイアスを加えた際には、逆に電流・輝度共に大幅に減少した。このことから、 LiClO_4 をドープした試料では、可動イオンが空間電荷分極することにより有機膜中へのキャリアの注入が促進されたと考えられる。図 5 は LiClO_4 のドーピングに伴うイオン空間電荷形成のモデル図を示したものである。モデル図に示すように、 LiClO_4

図 5 イオン空間電荷分極のモデル図
Fig. 5 Schematic image of ionic space charge polarization in MDP film.

をドーピングしない素子においては ITO 電極側を陽極とし、Al 電極側を陰極として電圧を印加したとき、有機膜において図のような電界が発生して両電極からキャリアが注入される。一方、 LiClO_4 をドーピングした素子においては、電圧印加直後は膜中の可動イオンの Li^+ イオンと ClO_4^- イオンが膜中に分散して存在するため有機膜中に一様な電界が加えられると考えられるが、時間の経過と共に Li^+ イオンは陰極の Al 電極側に移動し、 ClO_4^- イオンは陽極の ITO 電極側に移動して電極近傍にヘテロ空間電荷を生じることが予想される。この結果生じた電界偏歪により界面の電界強調が生

図 4 A 及び B 溶液から作製した ITO / MDP (100nm) / Al 素子の I-V 及び L-V 特性とスキャン回数依存性
Fig. 4 The I-V and L-V curves of device A and device B (ITO/ MDP (100nm) / Al) as a function of the number of positive biasing scans.

図 6 C 及び D 溶液から作製した ITO / MDP (90-100nm) / Al 素子の I-V 及び L-V 特性とスキャン回数依存性
Fig. 6 The I-V and L-V curves of device C and device D (ITO/ MDP (90-100nm) / Al) as a function of the number of positive biasing scans.

じてキャリアの注入が促進されて電流が増加したと考えられる。逆に LiClO_4 をドーピングしない場合は、この考えを延長する限り、ホモ空間電荷の影響があったものと考えることができる。

図 6 は、同様の実験を展開溶液 C と展開溶液 D によって作製した有機 EL 素子について行った結果を示したものである。なお、膜厚は 90–100nm であった。まず、C の素子と D の素子について共に 1st スキャン時の電気特性を比較してみると $50\text{mA}/\text{cm}^2$ 流れるに必要な電圧は、C の素子が 19.5V であるのに対し、D の素子は 14.5V となっている。また、 $100\text{cd}/\text{m}^2$ の発光に必要な電圧については 17V から 13.5V 近くに低減されており駆動電圧の低下が顕著であった。また、スキャンを繰り返すと、C の素子においては A の素子と同様にスキャン回数を増すに従い、電流密度及び輝度が減少した。また、D の素子においては B の素子の場合と同様にスキャン回数を増すに従い電流密度及び輝度が向上している。このことから有機膜中にドーブした可動イオンがスキャンを繰り返すことで電極界面に移動してキャリアの注入を促進したと推測される。つまり、有機膜中でイオン空間電荷分極が十分に行われるまではスキャン回数を増やすに従い電流密度や輝度が向上すると考えられる。なお、C の素子に比べて D の素子のほうが同電流密度に対する輝度、すなわち効率は低くなっている。これは、イオンによる注入キャリアの増加率が電子と正孔とで異なっていることを示唆する。つまり、電流を支配している方のキャリア注入が特に促進されて、正孔と電子のキャリア注入バランスがとれなくなったためと考えられるが、詳細は今後検討していくべき課題である。また、図 4 と図 6 とを比較すると、明らかに電子輸送材料を Alq_3 から BuPBD に変更することで大幅な駆動電圧の低下と輝度の向上が得られることがわかる。この理由の一つとして図 2 に示したような両者のエネルギー構造の違いが考えられる。すなわち、 Alq_3 を用いた場合、 Alq_3 の HOMO 準位の位置が PVCz 等と近いことから Alq_3 に正孔がトラップされやすいと考えられる。もともと正孔移動度が低い Alq_3 を分散した事で正孔移動度は極端に低くなり¹³⁾、これにより電流制限がかかる可能性が高い。一方、 BuPBD は正孔に対する障壁が他の材料に比べて高いために効率よく Coumarin6 への電子・正孔対の輸送が行われたと考えられる。また、 Alq_3 が Li と反応することも指摘されており、この点も特性に影響していると思われる¹⁴⁾。

次に、分極に必要な電界強度と時間について検討するため、A 及び B の素子に 600 秒間のステップ電圧を加えた場合の電流-時間 ($I-t$) 特性を測定した。なお、電圧は平均電界換算で加えており、1) $+1.25\text{MV}/\text{cm}$ 、2) $-1.25\text{MV}/\text{cm}$ 、3) $+1.5\text{MV}/\text{cm}$ 、4) $-1.5\text{MV}/\text{cm}$ 、5) $+1.75\text{MV}/\text{cm}$ 、6) $-1.75\text{MV}/\text{cm}$ 、7) $+2.0\text{MV}/\text{cm}$ 、8) $-2.0\text{MV}/\text{cm}$ の順に測定を行った。測定温度は 30 度で一定とした。図 7 に膜厚を

それぞれ約 130nm 及び 150nm とした A 及び B の素子の $I-t$ 特性を示す。A の素子においては時間の経過とともに電流密度が減少し 10 分間で半分程度まで減少した。一方、B の素子においては $+1.25\text{MV}/\text{cm}$ の電界を印加した場合の電流密度の時間変化は少ないが、 $+1.5\text{MV}/\text{cm}$ 以上の電界を加えると電圧印加直後に一旦電流が減少し、それから電流密度が増加した。なお、電流値は負バイアスを加えると逆に減少し、再び正バイアスを加えることで再現性よく増加した。また、印加する電界が高いほど電流密度の増加率が増し増加に要する時間も減少した。特に $+2.0\text{MV}/\text{cm}$ の電界を印加したときの電流密度は 200 秒程度で飽和状態となり飽和値は 20 倍近くまで増加した。つまり、電界値を高めることで短時間に有機膜中を可動イオンが分極し注入促進されていると考えられる。

次に、図 7 の B の素子について、ステップ電圧 (プレバイアス) 印加直後における $I-V$ 特性を調べた。結果を図 8 に示す。図から、正のプレバイアスを印加すると電流密度が増加しており、増加量は電界強度と共に増大している。逆に、負のプレバイアスを加えると電流は減少していることがわかる。なお、負方向のプレバイアスによって減少した電流密度は正方向のプレバイアスを加えることで再び回復しておりこのことから空間電荷の影響が強いと考えられる。また、図において例えば、 $\pm 1.75\text{MV}/\text{cm}$ のプレバイアス処理を施した試料の 25V における電流密度を比較するとおよそ 50 倍となっており、 $\pm 2.0\text{MV}/\text{cm}$ のプレバイアス処理をした場合の電流密度はおよそ 300 倍となっている。つまり、 LiClO_4 をドーピングした素子はプレバイアスにより電流密度を 2、3 桁の範囲で制御可能であると言える。なお、同試料の可動イオンの分極状態は $I-V$ 特性から判断する限り 1 時間程度は安定に維持される。

図 7 A 及び B の素子の電流-時間特性

Fig. 7 The $I-t$ curves under the electric fields between $+1.25\text{MV}/\text{cm}$ and $+2.0\text{MV}/\text{cm}$ (a) in device A (130nm) and (b) in device B (150nm)/Al.

図8 Bの素子(150nm)の電流-電圧特性のプレバイアス電界依存性

Fig. 8 The I-V curves of device B (150nm) after various prebiasing between -2.0MV/cm and $+2.0\text{MV/cm}$.

ところで、同様の現象は D の素子においても予想されるが、図7の結果から PVCz をホスト材料とした MDP 膜のイオン空間電荷分極形成に必要な電界は 2MV/cm 程度である。図6の結果から予想されるように 2MV/cm 近い電界を D の素子に加え続けると、電流過剰による熱破壊を誘発する。このため、D の素子について図7と同様の測定を行うことはできなかった。けれども、高分子中のイオン性キャリアは熱活性であるため、高温ではより低い電界で短時間にて分極形成することが可能である。そこで、D の素子(膜厚約 120nm)について室温にて 2MV/cm の電界を加える代わりに 80°C に加熱して振幅 1.8MV/cm の三角波(正方向のみ・ 10mHz)を加えて分極処理を行った。その後、数分で 30°C に急冷して時間間隔において I-V 及び L-V 特性の測定を行った。その結果を図9に示す。なお、図中の時間 0 分は 30°C にした直後の測定結果を示す。また、10 分、30 分、1 時間等の値はそれぞれ、次の測定までの時間間隔を示す。図から明らかに、分極処理を行わない試料では 20V の電圧を加えても発光はほとんど見られないが、 80°C で分極処理を行うことにより電流と輝度が大幅に増加した。特に輝度は数 100 倍も増加しておりその効果は著しい。また、同図において、電流及び輝度は最初の 1 時間程度で 0 分値の半分近くまで減少するが、その後は安定となった。一連の測定後、1 日経っても素子特性には有意な変化は見られなかったが、 100°C にて 10 分間熱処理を行うと分極なしの場合の特性に戻り、再び 80°C にて分極処理を行うことで分極直後の特性が再現された。一旦 安定となった 6 時間以上の結果が、分極なしの試料に比べ際立って特性が良いことは応用上意義深い。こうした安定な分極形成は低誘電率材料ゆえの低イオン移動度にあると考えられる。このことから、分極イオンの脱分極

図9 Dの素子(120nm)のI-V及びL-V特性への分極効果とその経時変化

Fig. 9 The change in the I-V and L-V properties as a function of interval of measurement in device D (120nm) after the poling at 30°C . (The poling was done at 80°C .)

には 1 時間程度のものと数日に及ぶような長時間の少なくとも二つ以上の緩和時間があることが示唆される。これは、 Li^+ イオンと ClO_4^- イオンの移動度の違いによると考えられるが、イオン種と緩和時間の関係等について今後検討していく必要がある。

最後に、本研究で用いた素子のイオン分極量について簡単に検討してみる。図7(b)の結果において 2MV/cm のプレバイアスにより電流が飽和したことから、 2MV/cm のプレバイアス処理によって膜中に存在するイオンが電極界面近傍に全て蓄積したものと仮定してみる。図8において例えば 10^{-2}mA/cm^2 を得るに要する電圧に着目するとプレバイアス前及び正・負プレバイアス後においてそれぞれ 23、17、30V を得る。外部電圧が試料に平均的に加わると仮定した場合、この電圧シフト量から見積もられる電極界面の電界変歪量はおよそ $\pm 0.5\text{MV/cm}$ となる。なお、図9のDの素子において分極処理前後の電圧シフト量を同様に算出した場合、 $0.7\sim 0.8\text{MV/cm}$ が得られ、試料間のばらつきがあるもののオーダーとしては一致する。そこで、例えば 0.5MV/cm の電界形成に要する面電荷密度から電極界面の蓄積イオン濃度を見積もると約 $8 \times 10^{15}\text{個/m}^2$ を得る。これは、ドーピングした LiClO_4 の 800 分の 1 程度に相当し、約 0.1% が解離したと見積もられる。一般に、イオンの解離確率は媒質の誘電率に依存する。オンサガー理論に従うと、 LiClO_4 について MV/cm オーダーの電界下で 0.1% オーダーの解離確率を得るためには比誘電率 15–20 を必要とし、イオンの解離は難

しいと考えられる。けれども、最近高分子固体電解質の分野においてポリビニルアルコール、ポリパラベン酸などガラス転移温度が高く低誘電率の高分子材料でも高いイオン伝導性を示すことが報告されている¹⁵⁾。これら高分子固体電解質に共通の特徴はいずれも陽イオンに配位力を持つドナー原子 N、O を屈曲した構造で持つことであり、同様の構造が本研究で使用した分子にも見られることから、これらの分子やわずかに残った水や残留溶媒のもつ双極子とイオンとの相互作用がイオンの解離に寄与したものと考えられる。

5. まとめ

本研究では低分子分散型の分子分散ポリマーを用いた単層型有機 EL 素子において LiClO₄ のようなイオン性不純物を 1wt% 程度ドーピングし有機 EL 素子の電流及び輝度特性に与えるドーピングと分極処理の効果について検討した。塗布法によって作製した試料では残留溶媒や水等による特性の影響が危惧されるが、熱処理により特性の向上が期待できる。また、LiClO₄ を少量加えた素子においては駆動電圧が低減されるが、さらに素子に前処理として MV/cm オーダーの電界にてプレバイアスを加えるとヘテロ空間電荷形成に伴う素子特性の一層の向上が可能である。また、イオン性不純物を添加した試料の特性はプレバイアスの極性と大きさにより数 100 倍の範囲で制御可能であり、その効果は 1 時間程度で一旦半減するものの、その後は 1 日以上維持されることがわかった。本研究で得られた成果は、適切なイオン性不純物の添加と分極処理により簡便に分子分散ポリマー有機 EL 素子の特性改善が図れる可能性を示すものである。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金 (No.11875070) の援助によって行われた。

(平成 12 年 11 月 1 日受付、平成 13 年 1 月 9 日再受付)

文献

- 1) J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. L. Burns, and A. B. Holmes : Nature, 347, 539 (1990)
- 2) 城戸：光を制御する次世代高分子・超分子—第 5 講 高分子薄膜のエレクトロルミネッセンス, 高分子学会編, (1999)
- 3) J.Kido,K.Hongawa,M.Kohda,K.Nagai,K. Okuyama : Jpn.J.Appl.Phys.31, L960 (1992)
- 4) J. Kido, H. Shionoya and K. Nagai : Appl. Phys. Lett., 67, 2281 (1995)
- 5) 森、遠藤、林：応用物理 61(1992) 1044
- 6) 林、筒井、斎藤：日本化学会誌 649 (1995)
- 7) K. Tada, M. Onoda and H. Nakayama : Jpn. J. Appl. Phys. L833 (1999)
- 8) J. Bharathan and Y. Yang: Appl. Phys. Lett. 72, 2660 (1998)
- 9) 家田、沢：応用物理 48, 1177 (1979)
- 10) Y. Suzuoki : Jpn. J. Appl. Phys., 24, 604 (1985)
- 11) A.Schmidt,M.L. Anderson,and N.R.Armstrong : J. Appl. Phys., 78, 5619 (1995)
- 12) Ch.Jonda,A.B.R.Mayer,W.Grothe : J. Appl. Phys. 85, 6884 (1999)
- 13) S. Nara, H. Okada, H. Onnagawa, J. Kido and T. Tsutui : Jpn. J. Appl. Phys., 38, L1252 (1999)
- 14) J.Kido,T.Matsumoto : Applied physics Letter 73, 2866 (1998)
- 15) 井波、神原、山本 : Polym. Prepr. Jpn., 37, 3589 (1988)

伊東栄次

(正員) 1969 年 7 月 7 日生まれ。98 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。同年 4 月、信州大学電気電子工学科助手、現在に至る。工学博士。

主として、有機超薄膜の界面電子物性に関する研究に従事。電気学会、応用物理学会会員。

山下孝教

(正員) 1977 年 9 月 21 日生まれ。2000 年 3 月信州大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月信州大学大学院工学系研究科博士前期課程進学。現在に至る。

宮入圭一

(正員) 1943 年 5 月 22 日生まれ。72 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。94 年 4 月信州大学工学部教授、現在に至る。固体誘電体の電気物性、特に薄膜の高電界現象に関する研究に従事。70 年電気学会論文賞。応用物理学会、高分子学会、電子情報通信学会会員。

付録 輝度の換算について

発光体の表面積を A、発光体表面の垂線と観測方向の光度を I、発光体表面の垂線と観測方向の角を θ とすれば輝度 B は

$$B = \frac{1}{\cos \theta} \frac{dI}{dA} = \frac{1}{\cos \theta} \frac{d\Phi}{dA d\Omega}$$

$$= \frac{1}{\cos \theta} \frac{dA}{d\Omega} \left[\frac{I_{\text{photo}}}{\frac{1}{683} \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \eta_1} \right] \frac{1}{r^2}$$

で与えられる。ここで、 dA 及び dS はそれぞれ試料及びフォトダイオードの面積を示す。 $d\Phi$ は光源からの距離 r の点の微小面積 dS が作る微小立体角 $d\Omega$ 中の光束である。また、 I_{photo} はフォトダイオードの電流値、 λ_0 は基準となる光の波長 555nm (540×10^{12} Hz)、 λ_1 は発光波長、 η_1 は λ_1 におけるフォトダイオードの受光感度 (単位は A/W) を示す。