

## 質問コーナー

### 「物性なんでも Q&A」第 20 回 薄膜の光学的評価

科学技術振興機構(JST) 佐藤勝昭

このコーナーでは、小生のホームページの「物性なんでも Q&A」コーナーに寄せられた質問と回答の中から、結晶工学関係者にご関心のありそうなものをピックアップしてご紹介しています。今回は、結晶評価によく用いられる「薄膜の光学的評価」に関する質問をご紹介します。

分類	番号	質問内容	所属
薄膜光物性	25	薄膜の吸収スペクトルから干渉縞を除くには	大学研究者
薄膜光物性	108	光学定数から薄膜の反射率を計算できるか	企業
薄膜光物性	1067	光学薄膜の反射	大学研究者
薄膜光物性	1175	ウェーハの薄膜干渉色除去	企業
多層膜光物性	152	多層膜の反射率	企業
多層膜光物性	1169	金属多層膜のプラズモン	企業

#### 25. 薄膜の吸収スペクトルから干渉縞を除くには

Date: Tue, 24 Aug 2004 15:55:04 +0900

Q: 阪大産研のMJです。急のメール大変申し訳ありません。ところで、過去の結晶工学スクールで、反射スペクトルをとる時の話として、干渉がスペクトルにのるときに、その干渉分をキャンセルする方法があると聞いたのですが、それについて詳しく教えて貰えません。よろしくお願いします。

MJ様、佐藤勝昭です。

A: メールありがとうございます。干渉縞をキャンセルするには、 $T$ と $R$ のスペクトルを測定し、 $T/(1-R)$ を求めれば、ほとんど干渉は消滅します。 $\exp(-\alpha d)=T/(1-R)$ として $\alpha$ を求めて下さい。なお、これには、近似がはいつています。正確な議論は、下記の論文をご覧ください。

R. H. Klazes et al.: Phil. Mag. 45 (1982) 377.

Y. Hishikawa et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 30 (1991) 1008

## 108. 光学定数から薄膜の反射率を計算できるか

Date: Mon, 29 Jul 2002 17:19:55 +0900

Q: はじめまして。N社Sと申します。

先生のHPを拝見させて頂き、光学定数に関する質問等を見つけました。かねてから疑問であった点について、ご教授願えませんでしょうか？

薄膜(厚さ  $d \approx 50$  nm)の光学定数  $n, k$  の各波長における測定値が判っている場合、その値から、単色光が垂直入射したときの薄膜からの反射率を計算することが出来ますでしょうか？それとも何か不足のファクターがありますか？計算式が分かると有り難いのですが、よろしく願いいたします。

Date: Mon, 29 Jul 2002 22:03:51 +0900

A: S様、佐藤勝昭です。薄膜の吸収や反射には、多重反射と干渉が関与してきます。薄膜の場合、空気と基板の界面、基板との界面という2つの界面が関与しています。(もちろん基板の裏からの反射も多少関係ありますが、通常は無視します。)

空気(屈折率1とします)と薄膜の界面での電界の反射率  $r_0$ 、電界の透過率  $t_0$  としますと、

$$r_0 = (1 - n - ik) / (1 + n + ik), t_0 = 1 - r_0$$

膜から空気への反射率は  $-r_0$ 、透過率は  $1 + r_0$  です。

一方、薄膜と基板(屈折率  $n_s$ )の電界の反射率  $r_1$ 、電界の透過率  $t_1$  については、

$$r_1 = (n + ik - n_s) / (n + ik + n_s), t_1 = 1 - r_1$$

となります。

従って、反射の電界  $E_r$  は、(空気との界面での反射光)+(基板との界面での反射光が空気との界面を透過した光)+(基板での反射光が空気との界面で反射され、基板で反射し空気との界面を透過した光)+・・・となります。薄膜の中を通過するとき、光は位相の変化を受けるので、それも考慮すると、

$$\begin{aligned} E_r &= E_0 r_0 + E_0 (1 - r_0^2) r_1 \exp(i2\phi) \{ 1 - r_1 r_0 \exp(i2\phi) + (-r_1 r_0) 2 \exp(i4\phi) + \dots \} \\ &= E_0 r_0 + E_0 (1 - r_0^2) r_1 \exp(i2\phi) / \{ 1 + r_1 r_0 \exp(i2\phi) \} \\ &= E_0 \{ r_0 + r_1 \exp(i2\phi) \} / \{ 1 + r_1 r_0 \exp(i2\phi) \} \end{aligned}$$

と表せます。ここに  $\phi = 2\pi(n + ik)d/\lambda$  は薄膜の中を光が進むときの位相の変化です。(これは複素数です) 従って

電界の反射率  $r$  は、

$$r = E_r / E_0 = \{ r_0 + r_1 \exp(i2\phi) \} / \{ 1 + r_1 r_0 \exp(i2\phi) \}$$

で表されますから、光強度の反射率  $R$  は

$$R = |r|^2 = r^* r \quad (r^* \text{は } r \text{ の共役複素数})$$

によって計算できます。

このように、反射率を計算するには薄膜の光学定数だけでなく、基板の屈折率も必要です。

藤原史郎編「光学薄膜」(共立出版1985初版)p.12-18が参考になります。

Q2: Date: Tue, 30 Jul 2002 13:52:25 +0900

N社Sです。早速のご回答ありがとうございます。このような質問に迅速に、また、わざわざ出典までお調べ頂きまして感激しております。どうもありがとうございました。

具体的な事例を申しますと、シリコンウエハ ( $d=750\mu\text{m}$ ) 上のシリコン酸化膜 ( $d=50\text{nm}$ ) からの反射率を求めたかったのです。そのときに、シリコン酸化膜を透過した光が、シリコン表面に到達し、そこから反射するとした場合の反射率の割合を計算したかったのです。この場合、シリコン酸化膜からの反射率と透過率を計算すれば、シリコン基板の屈折率も必要でしょうか？再三ですが、よろしく願いいたします。

A2:Date: Tue, 30 Jul 2002 14:14:14 +0900

S様、佐藤勝昭です。メール有り難うございます。シリコンの酸化膜  $\text{SiO}_2$ (あるいは  $\text{SiO}_x$ )は石英ガラスですから、紫外光まで透明です。従って、50nmの  $\text{SiO}_2$ なら多重反射を考えなければ全く無意味です。基板面の反射にはSiの光学定数が必要です。この場合、 $n, k$ ともに必要です。私が書いた式において  $n_s = n_2 + ik_2$ として下さい。シリコンおよび  $\text{SiO}_2$ の光学定数の正確な値はPalikのHandbook of Optical Constants of Solids (Academic, 1985)に載っていますからそれを使ってください。  $\text{SiO}_2$ (amorphous)はp749, Siはp552です。

Date: Tue, 30 Jul 2002 16:33:24 +0900

Q3:たびたびすみません。N社Sです。本当にありがとうございます。頂いた式は理解できました。これに関してあと2点ほど質問があります。

たいへん初歩的な質問で恥ずかしいのですが、複素数の計算方法です。光学定数  $n-ik$ をどうやって計算するかです。エクセルで複素数を計算するコマンド等ありましたか？関数電卓で、複素数計算可能なものあるのですが、今手元にありません。あと、ご紹介頂いたHandbook of Optical Constants of Solidsですが、このデータブックは、光学定数以外にどのようなデータがあるのでしょうか。

A3:Date: Tue, 30 Jul 2002 19:46:16 +0900

S様、佐藤勝昭です。

私は、電界の式に  $\exp(-i\omega t)$ の形を採用しているので複素屈折率として  $n+ik$ を採用していますが、結果は変わりません。Mathematicaなら式の通り、あるいはFortranでも複素数が使えます。複素数がいやなら、面倒ですが、実数部と虚数部に分けて計算してください。なお、Handbook of Optical Constants of Solidsには、光子エネルギーと屈折率、消光係数の関係が出ています。エクセルによる計算については、大塚電子の大川内様から、次項のようなコメント「「エクセルで薄膜の反射率が計算できる」をいただいています。

## コメント「エクセルで薄膜の反射率が計算できる」

Date: Sun, 18 Aug 2002 16:02:53 +0900

C1: 大塚電子の大川内です。

先生の HP を見ておりましたら、2002.07.29 に N 社 S さんの「光学定数から薄膜の反射率を計算できるか」という ご質問の中に、「エクセルで計算は可能か？」という問いがございました。私の手元にある Microsoft Excel 2000 には、いくつかの複素数関数が用意されており、これらを使うことにより結構短時間に先生の式を用いて反射率の計算を行う事ができましたので、エクセルシートを添付書類でお送りさせていただきます。Windows 上でご覧頂けます。[http://homepage2.nifty.com/bussei\\_katsuaki/hansharitu.xls](http://homepage2.nifty.com/bussei_katsuaki/hansharitu.xls) からダウンロードできます。)

SiO<sub>2</sub>、Si の屈折率消衰係数  $n, k$  は Handbook of Optical Constants of Solids から内挿して、各波長の  $n, k$  を求めました。先生が HP にお書きになっていらっしゃるの垂直入射の反射率の式で、せっかく計算するなら、各入射角に対応した計算をしようと思いましたが、P 成分と S 成分をそれぞれ計算するのが面倒になり、結局垂直入射 (0 度入射) のみで計算するようにしました。膜厚値を入力すると、その SiO<sub>2</sub> 膜厚値の反射率が計算されます。

エクセルで計算すると。比較短時間で計算できますし、オーバーヘッドも少なくなくて良いのですが、複素数の四則演算にも関数を使わなければならないので、式が煩雑になりやすく、これ以上複雑な反射率の計算にはやはり C++ や Fortran などを使った方が、良いと思った次第です。

(注: 添付の Excel file の著作権は大塚電子(株)大川内様にあります。また、佐藤は計算式をチェックしていませんので、結果について責任を持ってません。ご利用される場合は、各自チェック願います。)

## 1067. 光学薄膜の反射

Date: Thu, 28 Feb 2008 02:56:17 +0900

Q: 佐藤勝昭先生: K\*\*大学のA\*と申します。先生のHPの「108.光学定数から薄膜の反射率を計算できるか?」を拝見させていただきました。光学薄膜は専門外で、疑問点および確認点が3つございましてメールを送りました。どうかよろしく願いいたします。

空気、薄膜、基板それぞれの複素屈折率を元に、界面での「電界の反射率および透過率」が求まると理解いたしました。さらに、反射の電界  $E_r$  は

$$\begin{aligned} E_r &= E_0 r_0 + E_0 (1-r_0^2) r_1 \exp(i2\phi) \{ 1 - r_1 r_0 \exp(i2\phi) + (-r_1 r_0)^2 \exp(i4\phi) + \dots \} \\ &= E_0 r_0 + E_0 (1-r_0^2) r_1 \exp(i2\phi) / \{ 1 + r_1 r_0 \exp(i2\phi) \} \\ &= E_0 \{ r_0 + r_1 \exp(i2\phi) \} / \{ 1 + r_1 r_0 \exp(i2\phi) \} \end{aligned}$$

と求めてくださっております。

1. 光が界面で反射あるいは透過した場合の位相変化ですが、これは「電界の反射率

および透過率」が複素数であるので、位相の変化も考慮していると理解してよろしいでしょうか？

2. 入射電界を  $E_0$  と定義しておりますが、実際には  $\exp\{i\omega t\}$  が隠れているが、光強度の反射率  $R$  を求める際は絶対値を取るので  $\exp\{i\omega t\}$  の絶対値は 1、この  $\exp\{i\omega t\}$  は省略してあると理解してよろしいでしょうか？

3. 電界  $E_r$  が空気側に反射してくるわけですが、この反射の  $E_r$  と入射の  $E_0$  が干渉し合って、空気側で  $E_0 + E_r$  の電界が生じるのではないかと思います。したがって、空気側では入射光と比べて  $(E_0 + E_r)/E_0^2$  倍の強度の光が観測されるのではないかと思いますがいかがでしょうか？

薄膜の膜厚や光の波長、複素屈折率（半導体材料は主に Si、SiO<sub>2</sub> なので不変）をうまく設計すれば光増幅デバイスのようなもの（最大で 4 倍？）ができそうです。

以上、私の身勝手な理解が含まれているかもしれませんが、その場合はご指摘いただけたらうれしく思います。ちなみに先生が紹介されている藤原史郎編「光学薄膜」（共立出版 1985 初版）p.12-18 は読ませていただいております。よろしくお願ひいたします。

---

Date: Thu, 28 Feb 2008 13:13:35 +0900

A: A 様、佐藤勝昭です。

A1. 当然、位相の変化が考慮されています。A:

A2.  $\exp(-i\omega t)$  は共通ですので、省略しています。

本来電界は実数ですから、電界を考える時は実数部をとることが暗黙の了解です。光強度を考えるときは、絶対値の 2 乗で考えるので 1 となります。

A3. 100% 反射のミラーを考えましょう。その時、媒体側の電界は 0 でなければなりませんね。すると、反射界面では連続性から、空気側の電界もゼロでなければなりません。このため、入射光と反射光は 180 度位相がずれています。エネルギー保存則から増幅はできません。光学設計でできるのは、透過で失う分をとり戻すことができるだけです。

---

Date: Thu, 28 Feb 2008 21:11:13 +0900

Q2: 佐藤勝昭先生：お忙しい中、ご回答ありがとうございました。参考にさせていただきます。大変恐縮ですが、3 番目の質問について再度尋ねたいと思います。

私の増幅という言葉の使い方が悪かったようで申し訳ございません。確かに 100% の反射率で、反射波の振幅は入射波と同じ振幅になり、入力と出力の比は 1 で、増幅率は 1 を超えません。

しかし、反射波と入射波が空気側で重なり合っでできる定常波の振幅は入射波の 2 倍になり、定常波の強度は入射波の 4 倍になるのではないかと思います。

以下が再質問です：

電界反射率  $r$ （大きさは 1 とは限らない）を用いまして、光強度の反射率  $R$  は

$$R = |r|^2 = |E_r/E_0|^2 < 1$$

と表され、一方、定常波  $E_0+E_r$  の光強度は入射波  $E_0$  の光強度とくらべて

$$|(E_0+E_r)/E_0|^2 < 4$$

倍で観測されるのではないかと思っておりますがこの考えは正しいでしょうか？

実は私は今、薄膜に光が垂直入射した際に空気側でできる定常波の強度を求めたいと思っております。何度も申し訳ございませんがよろしくお願いいたします。

-----  
Date: Fri, 29 Feb 2008 00:25:27 +0900

A2: A 様、佐藤勝昭です。干渉を考えておられるのですね。

入射光が  $E_0 \exp(i(k_0 r - \omega t))$  で垂直入射したときの振幅反射率が  $r = |r| \exp(i\delta)$  であったとしましょう。反射光は  $E_r = |r| E_0 \exp(-i(k_0 r - \omega t + \delta))$

両者を合成した電界は  $E = E_0 \exp(-i\omega t) \{ \exp(i k_0 r) + |r| \exp(i(\delta - k_0 r)) \}$

なので、強度は

$$I = E_0^2 \{ \exp(-i k_0 r) + |r| \exp(-i(\delta - k_0 r)) \} \{ \exp(i k_0 r) + |r| \exp(i(\delta - k_0 r)) \} = E_0^2 \{ 2 + 2|r| \cos(2k_0 r - \delta) \}$$

となり、 $I/E_0^2 = 2\{1 + |r| \cos(2k_0 r - \delta)\}$  となりますから、位置  $r$  とともに変動し、最大は  $2(1+|r|)$ 、最小は  $2(1-|r|)$  となります。 $|r|=1$  のときは、干渉縞のピークで4倍、極小で0となります。

-----  
Date: Fri, 29 Feb 2008 15:29:35 +0900

AA: 佐藤勝昭先生：このたびは何度もお丁寧な説明をありがとうございました。式の導出を確認いたしました。

教えていただいた  $I/E_0^2$  を導き出すプロセスを踏まえて今考えている別の光学薄膜構造（この質問では空気/薄膜/基板でした）に応用したいと思っております。

## 1175. ウェーハの薄膜干渉色除去

Date: Tue, 6 Oct 2009 19:13:30 +0900

Q1: 佐藤先生。N社K\*と申します。HPを拝見させていただきました。早速ですがご教示願えれば幸いです。弊社では半導体ウェーハの外観検査装置を開発しています。

ウェーハを5倍対物レンズで白黒ラインセンサに結像させ撮像しパターンマッチングで欠陥検査を行うものです。照明は同軸落射で白色LED(OSLAM)で行っています。ウェーハ内の複数チップから参照チップ画像を合成し、その各ピクセル濃度に許容値をもたせ被検査チップとマッチングしています。

ところがウェーハの場所によりチップ内のパターンの色に変化し、このため参照チップの許容値が大きくなりすぎてしまいます。濃度の変化は255階調で50程度でるところがあります。同じチップ内でも色変化が殆ど出ない場所、パターンもあります。色の変化はおそらくパッシベーション膜(0.5~3μm程度)とウェーハ面の干渉色が出ているものと考えます。この干渉色を除去する方法がありましたら教えていただけないでしょうか？よろしくお願いいたします。

Date: Wed, 7 Oct 2009 19:03:38 +0900

A1: 一般的に言って、干渉縞の除去は簡単ではありません。

一番よいのはスペクトルを測定し、厚みと屈折率を仮定してシミュレーションを使って、元のスペクトルを推定する方法です。おそらく市販の分光エリプソメータには、そのようなソフトが付属されているはずですが。単一波長で、推定するのは不可能に近いです。

Date: Wed, 7 Oct 2009 19:43:10 +0900

Q2: 佐藤先生、早速のご返事ありがとうございます。

ウェーハの同心円状に明るさムラがでます。透明膜厚は  $1\mu\text{m}$  程度のようにウェーハ中心と周辺で膜厚が変化し薄膜干渉により明るさムラが出ていると推測しています。

現実的な対策は  $450\text{nm}$  と  $550\text{nm}$  付近にピークがある白色 LED のスペクトルとカメラの分光感度をかけ合わせなるべく各波長で等しいカメラ感度となるようフィルタを工夫するのがいいような気がしています。(複数の波長の干渉縞を取り込み明るさの平準化を図る) LED 照明光の半分を  $\lambda/2$  板を通すというのは効果ないでしょうか？

Date: Thu, 15 Oct 2009 16:41:26 +0900

A2: K 様、佐藤勝昭です。お返事が遅くなりました。

白色 LED は青と黄色にピークがあるので、干渉縞も 2 つの単色光に対して起きます。白黒センサでは、それらの平均したものが、膜厚による濃淡として現れているのでしょうね。干渉縞の間隔より十分に小さな欠陥であれば、測定したい試料との標準試料との画像マッチングで見つけ出せると思います。このとき標準試料からの光量にばらつきがありすぎて、画像マッチングがうまくいかないということでしょうか。対症療法ですが、明るさの平均をとるというご提案でよいかと存じます。なお、 $\lambda/2$  板で干渉を消すことはできません。

Date: Thu, 15 Oct 2009 17:01:31 +0900

AA: 佐藤先生、ご回答ありがとうございます。ウェーハにはパッシベーションと呼ばれる透明の保護膜 (厚さ  $0.5\sim 3\mu\text{m}$  のようです) があります。

チップ内のパターンはどうやらミクロで見ると平坦ではなく、アルミ配線はおそらく  $1\mu\text{m}$  程度の厚みがあるようで、このアルミ配線部分では特にパッシベーション膜厚が薄くなっているようで、このため薄膜干渉の影響が強くていようです。同じウェーハ内でも場所により  $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$  の膜厚バラツキはあるようで、参照パターンチップ画像データで検査チップをパターンマッチングで検査していきますが明るさのばらつきのため、どうしても虚報や欠陥の見逃しが生じてしまいます。

白色 LED よりもキセノン光源が望ましいのですが、ランプ寿命が短いのが難点です。とりあえずフィルタにより LED スペクトルをなるべく平坦にすることと、欠陥検出ソフトのアルゴリズムの工夫で対処します。今後ともよろしくお願いいたします。

## 152.多層膜の反射率

Date: Fri, 29 Nov 2002 19:12:54 +0900

Q:佐藤先生、N社Sと申します。

前回は、光学定数から反射率が計算できますかにおいて、光学定数から反射率を計算する方法について質問したものです。その節はどうもありがとうございました。

その後、大塚電子(株)大川内様より、エクセルでの計算式を頂きました。大変ありがたく、使用させていただいております。どうもありがとうございました。この場をお借りしてお礼致します。

さて、前回の質問では、2層だけでしたが、3層以上になった場合を想定し、頂いたデータを基に、考えてみたのですが、入力の問題か、うまくいきません。今行おうとしていることは、空気、Si、SiO<sub>2</sub>、Siの順番で、垂直入射した場合を考えたのですが、もう1層増えた場合、最終的なSi層からの反射率がどのようになるかを計算すればよいかです。大塚電子(株)大川内様の「これ以上複雑な反射率の計算にはやはりC++やFortranなどを使った方が、良いと思った」というコメントにもありますが、3層以上になると、エクセルでは難しいのでしょうか。

Date: Fri, 29 Nov 2002 19:51:51 +0900

A: S様、佐藤勝昭です。多層の場合によく行われるのは、2層についての光学定数を等価的な1層の光学定数に繰り込んでしまい、その層と新たな第3層との界面を考える仮想屈折率の方法です。私は、磁気光学の計算にその方法を用いています。詳細は省略しますが、複素屈折率  $N_2=n_2-ik_2$  の下地層の上に、厚さ  $h_1$  で複素屈折率  $N_1=n_1-ik_1$  の薄膜をつけたとき、これを仮想的複素屈折率  $N_0$  の1層の媒体に置き換えることができます。

$$N_0=N_1 \times \{1-r \exp(-2i\phi)\} / \{1+r \exp(-2i\phi)\}$$

ここに、 $r=(N_1-N_2)/(N_1+N_2)$ 、 $\phi=2\pi N_1 h_1/\lambda$  このプロセスを使えば、何層でも繰り返すことができます。一度お試し下さい。

## 1169. 金属多層膜のプラズモン

Date: Tue, 11 Aug 2009 17:37:24 +0900

Q:佐藤先生：T\*大学部4年のY\*と申します。なんでも物性のホームページを拝見してメールさせていただきました。

現在、プラズモンに関して勉強しているのですが、多層膜における表面プラズモンを知りました。多層膜にする利点とは何でしょうか？

おそらく、多層膜にすることで、各層界面にプラズモン共鳴が起き、一層の場合よりもより大きいプラズモンのエネルギーを得られると思うのですが、1層目に金属がある場合、1層目の表面で光をほとんど反射してしまい、2層目まで光が届かず、表面プラズモンを各層で共鳴させることは不可能ではないでしょうか？



---

Date: Wed, 12 Aug 2009 12:29:24 +0900

A : Y君、佐藤勝昭です。4年生と言うことは、卒業研究のテーマでしょうか？  
なんでも Q&A は、原則として卒業研究や修士論文研究の課題にはお答えしていません。「多層膜にする利点」についてですが、おそらく研究室では、利点があるからこそテーマにしているので、「それくらいは理解してよ。」という気持ちでしょう。指導教員か大学院生に聞いてみてください。

「1層目に金属がある場合、1層目の表面で光をほとんど反射してしまい、2層目まで光が届かず、表面プラズモンを各層で共鳴させることは不可能ではないでしょうか？」というご質問ですが、多層膜といっても層の厚さが十分に薄ければ光は十分に下層まで届きます。光は多重反射も含め全体として平均した誘電率を感じます。

以下に、多層膜のバルクプラズモンによる磁気光学効果のエンハンスメント（増強効果）に関する私の研究論文を紹介します。

(1) Fe/Cu 多層膜（層厚 50-200 Å）では、Cu のプラズマ周波数 2eV 付近で磁気カー効果のエンハンスが見られます。

K.Sato, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 27, Part 2 [2] (1988) L237-L239.

(2) 光磁気記録材料として研究された Pt/Co 多層膜では層の厚さは数オングストロームです。この場合はプラズマは 6eV 付近に見えます。

K.Sato: J. Magn. Soc. Jpn. 17 Suppl. S-1(1993) 11-16.

(3) Fe/Au 人工格子において層厚が 10ML (ML=単分子層) のあたりでは、磁気光学効果のプラズモンエンハンスによるピークが 2eV 付近に見られますが、1ML~5ML ではプラズモン効果が明瞭に見られなくなります。これは層厚が薄くなると新たなバンド構造が生じて新たな L<sub>10</sub> 型金属間化合物になるからです。K. Sato, et al. : J. Appl. Phys. 86 [9] (1999) 4985-4996 をご参照下さい。なお、T. Neyer, et al. : J. Microscopy, 187 (2003) 184 - 192. が finite size effect について議論しています。

---

Date: Wed, 12 Aug 2009 14:26:08 +0900

AA: 佐藤先生 : Y\*です。ご回答、ご助言ありがとうございました。先生の論文を参考に勉強・理解してみます。

---

(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター  
〒102-0076 千代田区五番町 7 K's 五番町

---

(2013年 7月 6日受理)