CCDイメージセンサにおける飽和むらの解析

Analysis of Saturation Signal Fluctuation in CCD Image Sensors

荒野 隆則[†], 正会員 木村 孝之[†], 高塚 昇[†], 正会員 白木 廣光[†]

Takanori Arano[†], Takayuki Kimura[†], Noboru Takatsuka[†] and Hiromitsu Shiraki[†]

Abstract The saturation signal fluctuation that appears on the reproduced images of interline CCD image sensors with a vertical overflow drain is caused by fluctuations in the substrate impurity concentration. Besides such fluctuation, non-uniformity in the saturation level, i.e., bright and dark spots, is generated on CCD chips and wafers. These spots severely degrade image quality. We clarified the origin of the non-uniformity mainly by comparing images obtained at the saturation signal level with those obtained by electron injection from the substrate. We calculated the readout currents for both types of images for photo-diodes having various impurity concentration profiles. From these experimental and calculated results, we concluded that the bright and dark spots are caused by potential profile differences among photo-diodes, brought about by a slight variation in the impurity concentration in the diodes. We also suggest that the origin of the impurity variation is introduced by the dislocations formed during device fabrication.

キーワード: CCDイメージセンサ, VOD, 飽和むら, 電子注入, 不純物分布, 転位

1. ま え が き

VOD (Vertical Overflow Drain) つきフォトダイオードをもつインタライン方式CCD (Charge Coupled Device) イメージセンサでは, 基板にCZあるいはMCZウエハを使用すると, 基板不純物密度の変動が信号飽和時の画像上で渦巻状のパターンとして現れる¹⁾. またエピタキシャルウエハを使用したときには, 信号飽和時の画像のコントラストはCZやMCZウエハの場合ほど強くはないが, しばしば大きな明暗のむらが現れる¹⁾.

図1はエピタキシャルウエハに作成したCCDの信号飽和時の画像を, 筆者らがウエハ全面にわたって合成したものである. 図1より, ウエハ上では明部と暗部が砂丘の風紋のように分布していることがわかる. 風紋状の明暗は図1のように基板電圧が高い場合にはコントラストが強いが, 基板電圧を低くするとコントラストは弱くなる. また基板から蓄積層に電子を注入した画像 (以下電子注入画像という) では, 図1とは明暗が反転する. これらのことから, 明暗の原因はフォトダイオード間の不純物分布の不均一性にあると考えられる¹⁾. しかし, このような不均一性が生じる原因はわかっていない.

風紋状のパターンの明部や暗部の大きさはCCDのチップサイズと同程度なので, 基板バイアスが低い場合には, 図1の明部や暗部はチップ上ではコントラストの低いシェーディングとなり, 図1で見るほど有害ではない. したがって, CCDセンサの基板には主としてエピタキシャルウエハが使用されている.

しかし, 筆者らの実験によれば, CZ, MCZ, エピタキシャルいずれのウエハでも, 信号飽和時の画像には多数の点状の明暗が見られる¹⁾. これがいわゆる飽和むらである. 点状の明暗は目立ちやすく, 密度が非常に高いので画質を著しく低下させる. 特にエピタキシャルウエハの場合には風紋状の明暗より有害であると考えられる. 現実にCCDカメラでは, 通常点状の明暗が画像に現れないように信号を一定値でクリップしている. しかし, 飽和むらをなくすことができれば, 映像信号は飽和点以上でも緩やかに増加するから, この部分を利用することによって入射光に対するダイナミックレンジを大幅に増加することができる.

このように飽和むらは極めて有害であり, 除去すれば大幅な画質の改善が可能であるにもかかわらず, この原因を解析した報告は全く見当たらない. 本論文の目的は, エピタキシャルウエハの飽和むらの原因を解析することにあるが, その結果が他の種類のウエハに適用できるのかも検討する.

1999年8月24日, 映像情報メディア学会年次大会で発表

1999年12月28日受付, 2000年3月24日再受付, 2000年5月8日採録
†茨城大学 工学部 システム工学科

(〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1, TEL 0294-38-5187)

†Department of systems engineering, Faculty of engineering, Ibaraki University

(4-12-1, Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511, Japan)

図 1 信号飽和時の CCD チップの画像より作成したエピタキシャルウェハでの飽和むら ($V_{sub}=11.5V$)
The saturation non-uniformity on an epitaxial wafer.

2. 飽和むらの概要

飽和むらの測定に用いた CCD イメージセンサは図 1 のウェハの中央付近のチップを組み立てたもので、1/4 インチサイズ、320(水平)×247(垂直) 画素、画素ピッチは水平、垂直共に $10\mu m$ である。CCD センサは高不純物密度の CZ ウェハの {100} 面に形成した約 $30\mu m$ のエピタキシャル層に作成された。

図 2(a) は上記の CCD センサに、表面から光を入射した場合における常温での信号飽和時の画像（以下、光飽和画像という）である。図 2(a) には飽和むらが見られる。しかし、図 2(a) の撮像条件で入射光を遮断すると、飽和むらは消滅した。このことは、飽和むらには CCD レジスタやフォトダイオードの暗電流のばらつきは含まれていないことを意味している。

図 2(a) では飽和むらが一様に分布しているだけなので、これだけからその原因を調べることは難しい。図 2(b) は図 2(a) と同一チップの電子注入画像である。図 2(b) の中央部以外では [110] 方向（画素配列に平行あるいは直交する方向）に長いさまざまなコントラストの輝点が多数現れている。また中央部では輝点が高密度に現れるが、電子注入によるバックグラウンドによって個々の輝点は識別し難くなっている。図 2(b) では画像の中央の楕円形の部分を中心に電子の注入が起きているが、この原因はわかっていない。なお、図 2(a)(b) は光飽和画像と電子注入画像のむらが最も強調される基板電圧で撮像した。

以下では、光飽和画像と電子注入画像の関係を調べることによって飽和むらの発生原因を解析する。

3. 光飽和画像と電子注入画像の関係の解析

図 3 は CCD センサの画素の断面を示す。図 3 のフォトダイオード部の構造は、CCD センサの製作をお願いした企業の論文²⁾に、相対値で示されているフォトダ

	impurity concentration
surface	$1.0 \times 10^{19}/cm^3$
storage	$2.0 \times 10^{16}/cm^3$
barrier	$1.0 \times 10^{15}/cm^3$
substrate	$3.0 \times 10^{14}/cm^3$

図 3 1 画素の断面とフォトダイオードの深さ方向の不純物分布
A cross-sectional view of a pixel and impurity profile in a photo-diode along depth direction.

イオードの不純物プロファイルをもとに、特性のシミュレーションを行い実測結果と対応させることによって推定したものである。図 3 では不純物分布は、光飽和画像と電子注入画像の関係が解析ができるように箱形にしている。

3.1 光飽和画像と電子注入画像の信号レベルの計算

図 3 のフォトダイオードの各部の不純物密度が何らかの原因でわずかに変動したとして、光飽和画像と電子注入画像における出力信号レベルを電流密度として計算する。これらの計算では実験と同じ基板電圧、蓄積時間を用いた。光飽和画像に対する基板電圧は $11.5V$ 、電子注入画像に対する基板電圧は $0.8V$ である。また、いずれの画像に対しても蓄積時間および読出し時間は $82.3ms$ である。

光飽和画像に対する出力信号レベルを求めるために、まずフォトダイオードの蓄積層に注入する光電流と蓄積層から基板へオーバーフローする電流がちょうど等しくなる場合に対して、フォトダイオードに蓄積されている単位面積当たりの電子数 N_s を求めた¹⁾³⁾。次に出力信号レベルを qN_s/T_r によって計算した。ここで q は電子の電荷量、 T_r は読出し時間（蓄積時間 T_s に等しい）である。

表 1 の第 3 列の substrate 欄, barrier 欄, storage 欄はそれぞれ、フォトダイオードの基板、バリアあるいは蓄積層の不純物密度のうち 1 つだけを、図 3 の値から $\pm 1\%$ 変化させた場合の出力信号レベルである。また all 欄はこれらの不純物密度を同方向に $\pm 1\%$ 変化させた場合の出力信号レベルを示す。これらより出力信号レベルはバリア密度が変化した場合には $\pm 10\%$ 程度、すべての領域の密度が変化した場合には $\pm 7\%$ 程度変動するが、その他の場合には $\pm 2\%$ 程度の変化にとどまることがわかる。

(a)The reproduced image over saturation exposure ($V_{sub}=11.5V$).

(b)The reproduced image due to electron injection ($V_{sub}=0.8V$).

図 2 エピタキシャルウエハ上の 1 チップの画像 (蓄積時間 = 82.3ms)
Images obtained from a chip on epitaxial wafer, storage time=82.3ms.

すべての領域の密度が変化した場合の変化は、主としてバリア密度の変化によって起こっている。

電子注入画像における出力信号レベルは次の方法によって計算した。

- (1) 蓄積時間 T_s を 1000 等分し ΔT とする。
- (2) 蓄積層に電子が存在しないとしてフォトダイオードの深さ方向の電位分布を求める。
- (3) 電位分布に対し基板からフォトダイオードの蓄積層に注入する電流密度 (J_i) を求め⁴⁾、これに ΔT を掛け

てその間に蓄えられた電子数を求める。

- (4) 上で求めた電子数とそれまでに蓄積されている電子数の和 (N_r) から、蓄積層に電子が存在する幅 w ($w=N_r/N_d$, N_d は蓄積層のドナー密度) を計算し、 w に対応する電位分布を求める。
- (5) (3) へ戻る。

この計算を蓄積時間のあいだ繰り返すことにより、各段階での N_r , w , J_i が求まり、蓄積時間終了時点の N_r から qN_r/T_s を計算することによって、電子注入画像に

表 1 フォトダイオードの不純物密度変化と光飽和画像 ($V_{sub}=11.5V$) および電子注入画像 ($V_{sub}=0.8V$) における出力信号レベルの関係 ($\times 10^{-6} A/cm^2$)

The relation between impurity concentration variation in the photo-diode and output signal levels at over exposure and electron injection. ($\times 10^{-6} A/cm^2$).

impurity concentration		over exposure signal level	electron injection
substrate	+1%	1.17	1.44
	0	1.20	1.36
	-1%	1.25	1.28
barrier	+1%	1.31	0.74
	0	1.20	1.36
	-1%	1.10	2.43
storage	+1%	1.19	2.35
	0	1.20	1.36
	-1%	1.23	0.77
all	+1%	1.28	1.38
	0	1.20	1.36
	-1%	1.12	1.33

における出力信号レベルが求まる。

このような複雑な計算を行う理由は、蓄積層に蓄えられた電子数が増加すると基板から蓄積層を見たバリアが高くなり、注入される電子流が減少するためである。表 1 の第 4 列は、フォトダイオードの不純物密度を図 3 の値から $\pm 1\%$ 変化させた場合の、電子注入画像の出力信号レベルを示す。

ここで電子注入画像の性質にふれておく。図 4(a), (b), (c), (d) は上記のように各領域の不純物密度を $\pm 1\%$ 変化させた場合に対して、 w と基板から注入する電流密度の関係を示す。図 4(a) より、基板不純物密度が変化しても注入電流はほとんど変化しないこと、図 4(b), (c) より、バリア (蓄積層) の不純物密度が 1% 増加 (減少) すると蓄積層に流れ込む電流密度は約 1/3 (3 倍) に減少 (増加) し、1% 低くなると約 3 倍 (1/3) に増加 (減少) することがわかる。また、各領域の不純物密度を同方向に変化させた場合には図 4(b) と図 4(c) の現象が同時に起こるため、注入電流密度は図 4(d) のようにほとんど変動しない。

図 5 はバリア領域の不純物密度を $\pm 1\%$ 変化させた場合に対して、蓄積時間と注入電流密度の関係を示す。図 5 より、バリア密度が低いほど蓄積期間の初期に大きな注入電流が生ずることがわかる。図 5 より電子流密度を求め、それを蓄積時間で積分して得られる電子数が N_r なので、電子注入画像の出力信号レベルは蓄積の初期の注入電流によってほとんど決まることになる。したがって、蓄積時間が 10ms 以上であれば電子注入画像はほとんど蓄積時間依存性をもたない。このような結果は図 4(b) の特性からもたらされている。図 5 と全く同じ関係が、他の領域の不純物密度を変化させた場合にも成立している。

3.2 光飽和画像と電子注入画像の信号レベルの比較

表 1 の第 3 列と第 4 列を比較すると次のことがわかる。

(a) substrate

(b) barrier

(c) storage

(d) all

図 4 w と基板からフォトダイオードへ注入する電流密度の関係
The relation between w and electron current density injecting from substrate into photo-diode.

図 5 蓄積時間と基板からフォトダイオードへの注入電流密度の関係
The relation between storage time and electron current density injecting from substrate into photo-diode.

図 6 光電子蓄積時と電子注入時のポテンシャルプロファイル ($w = 0$)
Potential profiles for conventional photo-electron integration and electron injection, $w = 0$.

(1) 個々の領域の不純物密度が独立に変化したときには、光飽和画像の出力レベルの変動は、電子注入画像の出力レベルの変動より小さい。

(2) いずれの場合でも、光飽和画像の出力レベルが増加(減少)すれば、電子注入画像の出力レベルは減少(増加)する。したがって、2つの画像上で明暗は反転して対応する。

(3) バリア層の不純物密度が変化したときは、光飽和画像と電子注入画像の明確な明暗の対応が取れる。

(4) 基板あるいは蓄積層の不純物密度が変動したとき、あるいはフォトダイオード全体の不純物密度が1方向に変動したときは、いずれか一方の画像での出力信号レベルの変動が少ないため、明確な明暗の対応を取るためには精度の高い測定が必要である。

ここで表 1 の妥当性をバリアの不純物密度を $\pm 1\%$ 変化させた場合を例にとって説明する。図 6 は図 3 のフォトダイオードの深さ方向の電位分布を、 $V_{sub}=11.5V$ と

表 2 フォトダイオード各部の幅と光飽和画像 ($V_{sub}=11.5V$) および電子注入画像 ($V_{sub}=0.8V$) における出力信号レベルの関係 ($\times 10^{-6} A/cm^2$)

The relation between storage and barrier width and output signal levels at over exposure and electron injection. ($\times 10^{-6} A/cm^2$).

		over exposure signal level	electron injection
storage	+1%	1.19	6.75
	0	1.20	1.36
	-1%	1.21	0.23
barrier	+1%	—	0.36
	0	1.20	1.36
	-1%	1.03	4.57

$V_{sub}=0.8V$ の場合について示している。

光飽和画像の場合の出力信号レベルは、蓄積層の密度が一定ならば、蓄積層とバリア層の間の電位差 (V_{br}) に大略比例する。したがって、光飽和画像における出力信号レベルの変動は $\pm 10\%$ 程度の変化にとどまる。一方、電子注入画像の場合には、蓄積初期の注入電流は基板とバリア層の間の電位差を V'_{br} とすると、 $\exp(-qV'_{br}/kT)$ に比例するが(図 4(b))、蓄積時間の経過と共に w が増加して、 V'_{br} が大きくなり注入電流は無視できるレベルになる(図 5)。ここで k はボルツマン定数、 T は動作温度である。したがって出力信号レベルは大略 $\exp(-qV'_{br}/kT)$ に比例し、バリアの不純物密度によって大きく変化する。

フォトダイオードの他の領域の不純物密度が変化した場合の出力信号レベルの変化も、全く同様に電位分布の変化によって説明できる。

3.3 フォトダイオードの各部の幅の変化と出力信号レベルの関係

ここではフォトダイオードの各領域の密度が一定のまま幅が変化したとして、2種類の画像の出力信号レベルの変化を検討する。表 2 は蓄積層の幅が基板側へ $\pm 1\%$ 広がった場合(バリア層と基板の境界は不変)、およびバリア層が基板側へ $\pm 1\%$ 広がった場合に対する出力信号レベルを示す。これらの結果を表 1 と比較すると、特定の層を厚く(薄く)することは、その層の密度を高く(低く)することと等価であることがわかる。このような現象が起こる可能性を全く否定することはできないが、現在のところメカニズムを説明することは困難なので、本論文では計算結果を示すにとどめたい。

4. 光飽和画像と電子注入画像の飽和むら

光飽和画像と電子注入画像の関係を調べるため次の実験を行った。

4.1 光飽和画像と電子注入画像のコントラスト

図 2(a), (b) の中央部における同一水平ライン上の映像信号を測定した。図 2(a) の映像信号のコントラストは最大 $\pm 7.5\%$ 程度であり、図 2(b) の信号レベルが高い部分のコントラストは最大 $\pm 15\%$ 程度であった。この結果を表 1 と対応させると、バリアか基板の不純物密度が変

化していることになる。そこでまず、わずかな不純物密度の変化が2つの画像の出力レベルを共に比較的大きく変化させる場合（すなわち基板とバリア密度が変化する場合）について飽和むらの原因を考えることにする。

ここでバリアの密度が $\pm 1\%$ 変化したとすると、光飽和画像の出力レベルの変動は実験値と大略一致するが、電子注入画像の出力レベルの変動は実験値と比べて大きすぎる。しかし、実際のフォトダイオードは3次元形状をしているので、バリアの最小電位はチャンネルストップ電位の影響を受け、深さ方向だけを考えた場合のように大きく変化しない⁵⁾。この場合2つの画像の出力レベルの変化率は小さくなり、特に電子注入画像の変化率は小さくなる。一方、基板の密度が $\pm 3\%$ 変化したとすると、計算値と実測値は近くなる。しかし、チャンネルストップ電位の影響を考慮すると、 $\pm 3\%$ 以上の大きな基板密度の変化を必要とする。

4.2 光飽和画像と電子注入画像の明暗の対応

図7(a), (b)はそれぞれ図2(a), (b)の一部（電子注入が強く起こっている部分の周辺）の拡大図である。図7(a)の光飽和画像では明暗を強調するため映像信号の γ を1.4としている。これらの図においては1ドットが1画素に対応している。図7(a)では γ を上げたことによって明暗の広がりや方向や大きさを調べることが可能になっている。図7(a)のA, B, Cと図7(b)のA', B', C'は対応している。図7より光飽和画像でも電子注入画像でも、明暗はかなりの部分でフォトダイオードの配列方向すなわち[110]方向に数画素の範囲で伸びていることがわかる。しかし、数画素の範囲で輝度は一定でないし、明暗の線が交差している場合もある。また、図7(b)は前述の部分の画像であるため、輝点の数が多く、その方位も図2(b)の周辺部ほど明瞭ではない。

図8はこれら2種類の画像の明暗の対応を調べるために、図7の囲みの部分をさらに拡大したものである。図8のいずれの図においても、縦線の左側と横線の上側で明暗が反転した明白な対応関係が見られる。図8に示した以外にも多くの点で対応がとれる。このようにして目視でも20%以上の画素で明暗の対応がとれることがわかる。

明暗の対応をさらに詳しく調べるため、図7(a), (b)の水平ライン信号の一部を256階調でデジタル化したグラフを図9(a)に示す。図9(a)では61番目より左側のすべての画素で明暗が反転して対応していることがわかる。60番目より左の画素でもかなりの対応が見られる。なお、図9(a)の光飽和画像のグラフからこまかな凹凸を除いたものが風紋状の明暗に対応している。図9(b)はCZウエハの端部のチップの場合である。図9(b)でもよく対応が取れていることがわかる。図9(b)では基板抵抗の揺らぎによる緩やかな明暗の変動の上に飽和むらの明暗が重畳している。また図示していないが、MCZ

(a)over exposure

(b)electron injection

図7 図2(a), (b)の拡大図 (a) 光飽和画像 (b) 電子注入画像
Enlarged image of fig.2(a),(b). (a): image at over exposure (b): image due to electron injection.

ウエハでもCZウエハと同一の現象が観測された。

なお図9の測定は、基板電圧を変えて深さ方向の電位分布がウエハによらずほとんど同じになるように調整して行った。この測定において、光飽和画像と電子注入画像の明暗はウエハ全面に現れており、その方位、長さ、コントラストにはウエハの種類による差はないことを確認した。これまで述べてきたことおよびCCDセンサの作成には無転位のウエハが使われていることより、飽和むらの原因は製造工程で発生している可能性が強い。図9において明暗が反転しない画素がかなりあるが、このような現象は単一の領域の不純物密度の変動によっては説明できない。明暗が反転しない原因は次の小節で明らかにする。

4.3 光飽和画像と電子注入画像の明暗の原因

図8, 図9における2種類の画像の明暗の対応を詳細に検討するため、バリアと蓄積層の不純物密度の変化が複合的に起こる場合について検討する。表3はその計算結果である。表3において $\uparrow\downarrow$ は出力信号の増減を表す。case c,eの場合には2種類の画像の明暗が同方向に変化する。表3においてcase a,bの場合の結果は表1から予測できる。すなわち、蓄積層やバリアの不純物密度が大きく変化する場合、バリア不純物密度の変化の効果が

図 8 光飽和画像と電子注入画像の明暗の対応を調べるための図 7 の拡大図

Enlarged image of fig.7 to examine correspondence of black and white spots in the over exposure image and electron injection image.

図 9 光飽和画像と電子注入画像における同一水平ラインのデジタル信号

One digital horizontal line signal for over exposure and electron injection images.

表 3 蓄積層とバリア層の不純物密度変化に対する明暗の対応
Correspondence of black and white spots for different storage and barrier impurity concentration.

case	storage impurity concentration	barrier impurity concentration	output signal level	
			over exposure	electron injection
a	decrease(2%)	increase(2%)	↑	↓
b	increase(2%)	decrease(2%)	↓	↑
c	increase(2%)	increase(1%)	↑	↑
d	increase(1%)	increase(2%)	↑	↓
e	decrease(2%)	decrease(1%)	↓	↓
f	decrease(1%)	decrease(2%)	↓	↑

加した場合には光飽和画像の出力レベルはほとんど変化せず電子注入画像の出力レベルのみが大幅に増加するのに対し、バリアの密度が増加した場合には光飽和画像の出力レベルは増加し、電子注入画像の出力レベルが大幅に減少することに基づいている。

表 1 と表 3 より、光飽和画像と電子注入画像の明暗はほとんどの場合に反転して対応するが、反転しない場合も生ずることがわかった。なお基板の不純物密度が数%変化しても、図 2 のような構造では他の層の不純物密度の変化としては現れない。したがって表 1, 3 においてこのような効果は考慮していない。表 1, 3 は実験結果をよく説明できる。このことから、飽和むらの原因は、蓄積層、バリア層、基板の不純物密度が局部的あるいは複合的に変動し、フォトダイオード間で電位分布が変動するためと考えられる。しかし、このような現象が起こる理由はまだ明らかではない。ここではこのような不純物密度の不均一性が発生するモデルを提案し、それに関し多少の裏付けを行う。

CCD センサにおいてはチャンネルストップは [110] 方向に伸びており、フォトダイオードはこれに囲まれるように形成されている。チャンネルストップの間には CCD レジスタがある。またチャンネルストップと垂直に転送電極が存在する。{100} 面を有するシリコンウエハにチャンネルストップが形成されたり不純物がドーピングされたり電極が形成されたとき、それらによってシリコンウエハには歪力が存在する。また CCD センサの製作工程ではウエハは大きな熱歪力をうける。シリコンウエハはこれらの歪力によって {110} 面がすべり面となって刃状転位が発生することはよく知られている。このとき転位線は表面の一点からシリコン中に入り {111} 面内を折れ曲がった後表面に抜ける⁹⁾とされている。このとき転位線はフォトダイオードアレイに直交あるいは平行になる。このような転位線が重金属を固着することはよく知られている⁷⁾が、ドーパントを固着するという報告はない。この理由はドーパントの拡散係数は重金属より 8 桁程度小さい⁸⁾ため、転位の近傍に拡散してくるドーパントの量が少ないためと考えられる。しかし 1~2% の不純物密度の増加までが否定されているわけではない。

上述のような転位線の存在を確認するため、ジルトル

大きく現れて、光飽和画像と電子注入画像の明暗は反転して対応する。case c,d,e,f の場合は、蓄積層の密度が増

図 10 ジルトルエッチングを行った CCD センサに露呈したエッチングパターン (KEYENCE 製デジタル HD マイクロスコープ VH-7000 による)
Etching pattern on CCD chip revealed by Sirtl etching.

エッチング⁹⁾によって CCD チップの格子欠陥を露呈させた。その顕微鏡写真を図 10 に示す。図 10 ではフォトダイオード部に多数のエッチピットが見られる。図 10 では焦点深度が浅いため見えていないが、シフトレジスタ部にも多くのエッチピットが見られた。これらのエッチピットは転位線が表面に露呈した部分に対応すると考えられるが、内部での広がり方は不明である。なお CCD を作成する前のウエハではエッチピットは見出されなかった。またイオン注入による不純物密度の変動は 5 インチウエハ全体で $\pm 0.5\%$ 以下 (イオン注入機の保証値) であり、実測では $\pm 0.2\%$ 程度とされている。したがって、チップ間のイオン注入のばらつきはさらに小さく、飽和むらの原因とはなりえない。

以上の実験や考察から、転位線は図 10 のようにバリアや蓄積層あるいは基板を通過し、転位線の密度に応じてこれらの層のドーパントを固着して、不純物密度を増加させ、その結果、フォトダイオードの電位分布が変化し、飽和むらが生ずるというモデルを提案する。

5. 検討および結論

CCD イメージセンサの飽和むらの原因を解明するため、光飽和画像と電子注入画像の対応を詳細に調べ、前者の画像ではコントラストは低く後者の画像はコントラストが高いこと、これらの画像の多くの点で明暗が反転して対応することを明らかにした。またフォトダイオード各部の不純物密度を変えて、上記 2 種類の画像の出力信号レベルを計算し、これらの結果から実験結果をよく説明できることがわかった。これらより、飽和むらはフォトダイオード間のわずかな ($\pm 1\%$ 程度) 不純物密度のばらつきに基づく電位分布の不均一性によって生ずる

ことがわかった。さらに輝点や黒点が [110] 方向に長い原因として [110] 方向に伸びる転位線を想定し、それに対応すると思われるエッチピットを検出した。またこれらの転位線がフォトダイオード内のドーパントの密度を変化させることを示唆した。

常日ごろ有益な助言をいただき、CCD チップの格子欠陥の露呈に格別の便宜をはかって頂いた当大学工学部システム工学科針生教授、山内助教授、ウエハを頂いた住友金属 (株) 津屋技監、CCD センサを製作して頂き、測定法について有益なコメントを頂いた日本電気 (株) に謝意を表します。

【文 献】

- 1) 荒野隆則, 白木広光, 木村孝之, 高塚昇: “CCD イメージセンサにおける基板不純物密度揺らぎの測定”, 映像学誌, **53**, 2, pp.282-287(1999)
- 2) 村上ほか: “New Technologies of Photo-Sensitivity Improvement and VOD Shutter-Voltage Reduction for CCD Image Sensors”, ITE Technical Report, **23**, 30, pp.1-6(1999)
- 3) 白木 廣光: “VOD (Vertical Overflow Drain) の動作解析法”, テレビ誌, **48**, 12, pp.1625-1627(1994)
- 4) J.M.C.Stork, J.D.Plummer: “Small Geometry Depleted Base Bipolar Transistors(BSIT)-VLSI Devices”, IEEE Trans, **ED-28**, 11, pp.1354-1363(1981)
- 5) 木村孝之, 白木広光, 荒野隆則, 高塚昇: “CCD イメージセンサにおける基板不純物密度の変動と飽和信号レベルの変動の関係”, 電学論 E, **119-E**, 5, pp.295-301(1999)
- 6) H.Shiraki, J.Matsui, M.Kawamura, M.Hanaoka, T. Sasaki: “Bright Spot in the Image of Silicon Vidicon”, Japan J. of appl. Phys. **10**, 10, pp.213-217(1971)
- 7) W. K.Tice and T.Y.Tan: “Nucleation of CuSi precipitates colonies in oxygen-rich silicon”, Appl.Phys.Lette., **28**, pp.564-565(1976)
- 8) 物理学辞典編集委員会: “物理学辞典”, オーム社出版局, p.1372(1992)
- 9) E.Sirtl and A.Adler: “Chromsäure-Flußsäure als spezifisches System zur Ätzgrubenentwicklung auf Silizium”, Z.Metallkunde, **52**, pp.529-531(1961)

あらの たかのり
荒野 隆則 1998 年, 茨城大学工学部システム工学科卒業。2000 年, 同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。撮像デバイスの研究に従事。現在, 日立プロセスコンピュータエンジニアリング (株) 勤務。

きむら たかゆき
木村 孝之 1998 年, 豊橋技術科学大学大学院博士後期課程修了。同年, 茨城大学工学部助手となり現在に至る。結晶成長, 撮像デバイス, 画像信号処理, デバイス材料などの研究に従事。工学博士。正会員。

たかつか のぼる
高塚 昇 1998 年, 茨城大学工学部システム工学科卒業。2000 年, 同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。現在, 日本電気 (株) 勤務。

しらき ひろみつ
白木 廣光 1961 年, 名古屋大学理学部物理科卒業。同年, 日本電気 (株) 入社。マイクロエレクトロニクス研究所長。研究開発グループ主席研究員を経て, 1995 年, 茨城大学工学部教授。格子欠陥, 撮像素子, システムの研究に従事。立体視, 色彩論, 画像処理, デジタル映像などにも興味。工学博士。正会員。