



技術解説

自由電子レーザー応用研究の現状と将来

— 半導体, バイオメディカル応用を中心として —

粟津 邦男*, 坪内 夏朗**

STATE OF THE ART OF FEL APPLICATIONS RESEARCH

Key Words : Free Electron Laser, Semiconductor, Biomedicine

1. はじめに

自由電子レーザー(FEL)は1977年にスタンフォード大学のMadeyらによって波長 $3.4\mu\text{m}$ の発振に成功して以来, その研究開発は世界の数10箇所で行われてきた。しかしFELの応用研究に開放されている施設はそれほど多くはなく10箇所程度に限定されている。2年前に本「生産と技術」誌にこれらの状況について報告した¹⁾ので参照願いたいがこの傾向は基本的に現在の状況も変わっていない。FELシステムの研究開発に比べて応用研究に利用できるシステムはそれ程増えてはいない。国内では利用研究を主な目的としたFELシステムとしては我々の大阪大学以外に東京理科大学のFELシステムがその後稼働した。

大阪大学のFELシステムは波長 $0.23\text{--}100\mu\text{m}$ を2台の加速器と5台のアンジュレータでカバーしているが, 一般ユーザーに開放し, 需要が多く, 常用しているのは $5\text{--}17\mu\text{m}$ の中赤外(MIR)である。

東京理科大学のFELも $5\text{--}16\mu\text{m}$ であり国内の応用

研究の活発な波長帯と思われる。海外のFELシステムでは, 日本からの利用も多いUCSB(カリフォルニア大)は波長 $30\mu\text{m}\text{--}2.5\text{mm}$, またFELIX(オランダ)は $5\text{--}100\mu\text{m}$ と遠赤外を中心に行っている。

これらのFELシステムを利用して生体, 医用, 半導体, 光化学, 材料, 分析, プロセス, 加工などの幅広い応用研究がなされている。しかし全般的な傾向として依然として基礎研究が中心で一部の医学応用を除いて実用化までには到っていない。この理由の1つはFELシステムが大規模で高価格であることが上げられる。基礎研究はFELで行い, 実用化段階ではスペース効率, エネルギー効率, 低価格な光源の開発が必要と考えられる。

大阪大学においては2000年4月に(株)自由電子レーザー研究所から移管されたFELシステムをベースに大学院工学研究科に自由電子レーザー研究施設が発足した。2つの寄附講座において, 主に生体バイオを中心とした幅広い光量子プロセスの研究と半導体を中心としたFEL利用研究とこれらの応用を目的としたFELシステムの高度化研究を行っている。大阪大学の学内のみならず学外, また国研, 企業などとの共同研究は約50件が進行中である。前述のように常用しているのは $5\text{--}17\mu\text{m}$ の中赤外であるがこれ以外の波長の要求に対応するには若干の調整期間が必要である。応用研究に使用したビーム時間は平成13年度で約1600時間である。これでも各研究者からの要求時間に十分対応できず更なる利用時間の増大策を検討している。

本解説では大阪大学で行われた研究成果も含め, 世の中で行われている最近の半導体, 生体バイオの応用研究についての現状と今後の展望を以下に述べる。

2. 自由電子レーザーの利用研究

本施設を利用して約50機関との共同研究が進行している。研究テーマは半導体, 光化学, バイオサイ



*Kunio AWAZU
1958年11月生
1984年神戸大学大学院工学研究科修士
現在, 大阪大学・大学院工学研究科・自由電子レーザー研究施設, 客員教授, 工学博士・医学博士, 光生体工学
TEL 072-897-6417
FAX 072-897-6419
E-Mail awazu@fel.eng.osaka-u.ac.jp



**Natsuro TSUBOUCHI
1941年8月生
1964年東京大学工学部電子工学科卒業
現在, 大阪大学・大学院工学研究科・自由電子レーザー研究施設, 客員教授, 工学博士, 半導体電子工学
TEL 072-897-6416
FAX 072-897-6419
E-Mail tsubo@fel.eng.osaka-u.ac.jp

エンス等多岐にわたっている。利用研究者の要望が多い波長域は、5-17 μm であり、この理由としては、1)本波長領域に可変、高出力のレーザー光源がない、2)原子間、分子間の変革、伸縮振動モードは本領域に存在するため、この振動を利用した研究が注目されていることが考えられる。また本施設での利用時に、単純なFEL照射のみならず照射中の現象モニタ、照射前後の試料測定にも対応できるよう、各種の評価設備を備え研究者の要望に応えられるよう努めている。(共同研究は随時公募中)

3. 自由電子レーザーの応用研究

3.1 自由電子レーザーの半導体への応用

FELの半導体への応用研究は概略、3項目に分類できる。第一は半導体物理、デバイス物理の研究である。第二はFELを利用した半導体材料、デバイス、構造の評価計測である。第三はFELを利用した半導体プロセスの基礎研究である。発表研究論文数は圧倒的に第一の研究が多い。以下この項目に従い、いくつかの代表的な研究例を紹介する。

3.1.1 半導体物理の研究

FELを使用した半導体物理の研究は大きく2項目に分けられる。第1地は理論的には予測されていたが実験的には確認されていなかった、あるいはFELを使用することによりクリアに確認できた半導体物理現象である。例えばBloch oscillation, photon-assisted tunneling, phonon bottleneck現象などである。第二はFELの強力なMIR, FIR光によって初めて出現した半導体物理現象である。例えば量子井戸構造のTHzサイドバンド発生、フォトルミネッセンスなどである。以下にこれらについて簡単に紹介する。

半導体超格子のBloch oscillationがFELを使用して報告されている。Bloch oscillationは1928年にBlochによって理論的に予言されたものであるが1971年、Esakiらによって半導体超格子技術による実現の可能性が報告され、欧米を中心に研究が盛んとなった。応用としてはTHz発振器の可能性である。その後各種の超格子構造に対して、Bloch oscillationの理論的研究、実験的検証の試みがなされたがDC印加電圧だけでは発振の確認が困難であった。というのは超格子構造内の散乱によって電極から注入された電子はその位相が乱れ揃わないからである。一方最近FEL光を利用してBloch Oscillationの検

証実験が報告された²⁾。これはBloch周波数がFELのTHz電界とその高周波に同調した時、超格子のV-I特性の共振が生ずるといものである。これはFELによる強いTHz電界が得られることによって可能になった現象である。またGaAs/AlAs超格子にFEL光を照射してBloch oscillationを起こしそれによって高調波は発生することが報告されている³⁾。

赤外光を照射した時に量子井戸(quantum well; QW)間に流れるトンネル電流は量子カスケード(quantum cascade)レーザーあるいは量子井戸赤外検出器(quantum well infrared photodetector; QWIP)などの設計上の重要なパラメータである。FEL光を照射しphoton-assisted tunnelingの測定結果を報告している⁴⁾。2重の量子井戸構造をDCバイアスし、photon-assisted tunneling電流をFEL THz光を照射しながらI-V特性を測定する。DC電圧の増加と共にいくつかの電流のピークが観測されている。これは井戸と隣の井戸間のstimulated emissionによって生ずるピークであり、最初のピークはone-photon sidebandであり、さらに2つ目ピーク以下、2-photon sideband, 3-photon sidebandである。FEL光強度を増すに従いmulti-photon assisted tunnelingが可能になる。

QW中のサブバンド間のキャリアのライフタイムや緩和プロセスのメカニズムの解明はQWを使用した量子カスケードレーザーやQWIPなどのデザインに重要である。高いエネルギーのサブバンドから低いサブバンドへのキャリアの緩和時間がこれらのデバイスの速度を決定するからである。この緩和プロセスは2つのケースに分類される⁵⁾。図1に示すように、第一は狭い井戸構造の場合である。サブバンド間のエネルギー間隔は通常optical phonon energyより大きくなり、この条件では緩和はphonon emission

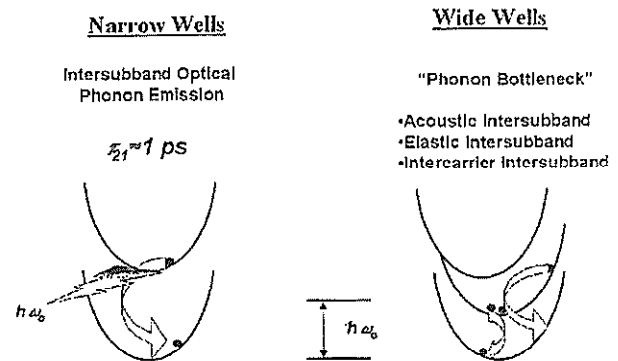


図1 サブバンド間のキャリアの緩和プロセス

で決まりその時間は1-2psである。第二は広い井戸の場合であり、サブバンド間のエネルギー間隔はoptical phonon energyより小さく、phonon emissionは抑えられphonon bottleneckと称する速度の制限を生ずる。この場合の緩和時間はacoustic phonon, intercarrier scatteringなどで決まり、数10psから数100psと遅い。第1のケースはTEA CO₂レーザーを使用しpump probe法で測定結果が報告されている。第2のケースには遠赤外のpsレベルのパルス巾が必要であるためFELを使用して多くの研究報告がなされている。構造については近年、量子ドットについての報告が多い⁶⁾。また材料についてはMIRのカスケードレーザーの実現を目指してSi/SiGeの量子井戸のサブバンド間の電子遷移のダイナミクスが報告されている⁷⁾。

FELを利用したTHz領域の強電場によって種々の新しい半導体物性が明らかにされてきた。λ=30μm-3mm(0.1-10THz)の自由電子レーザー光をGaAs/AlGaAsの量子井戸に照射し励起子のバンド内遷移の光学的検知の実験から、励起子の内部遷移のエネルギー準位の詳細が報告されている⁸⁾。量子井戸のTHzサイドバンド発生についても同様な実験が報告されている⁹⁾。

デバイス設計においてimpact ionizationは半導体の降伏(break down)現象を誘起するため重要な設計パラメータである。FELはTHz領域の高電界を誘起できるので半導体のimpact ionization現象を調べるのに適している。InAs/AlSbヘテロ接合へのFEL光の透過、反射、電気伝導度の測定からimpact ionizationを調べた例が報告されている¹⁰⁾。

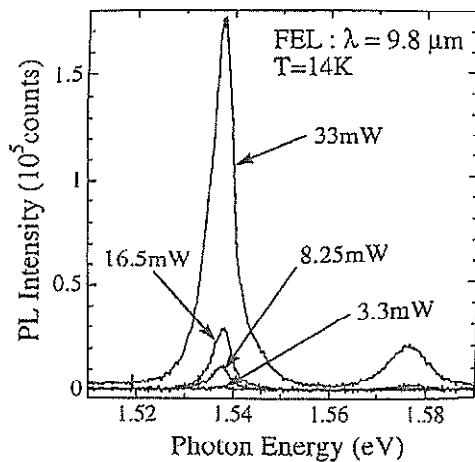


図2 GaAs/AlGaAsの発光特性

当研究施設のFELを使用した研究例としては、種々の半導体結晶に波長10μm程度のFEL光を照射しそのphotoluminescenceの観測があげられる。FEL光のエネルギーは0.1eV程度でありこのような低エネルギーでは通常バンド端発光が起こることはないがFELの高電界によってimpact ionizationが生じ、バンド間遷移が起こる。これらの発光はGaAsやGaNについて報告している¹¹⁾¹²⁾。1例として図2にGaAs/AlGaAsの発光特性と照射パワー依存性を示した。

その他FELの強電界効果を利用してダイナミックなFranz-Keldish効果など確認されている¹³⁾。

3.1.2 半導体の評価, 計測

FELのFIRと波長可変性を有効に利用してこれまで困難であった各種の半導体の評価, 計測が可能になった。特に10μm以上に対して、高出力の適当な波長可変光源がないためFELが用いられている。

化合物半導体のヘテロ接合のバンドオフセットをFELの波長を連続的に走査して測定する。報告されているヘテロ接合はZnSe/GaAs, ZnMgSse/GaAs, GaAlAs/GaAs, CdS/CdTeなどである¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。

新しいTHzの検出器を提案し、FELでその性能を確認した報告もある¹⁷⁾。すなわちGaAs/AlAs構造赤外線検出器の提案とFELを使用してその特性を評価している。GaAsのQW, AlAsのバリアが100層の超格子を用いたTHz検出器の感度特性をFELを用いて0.7-4THzの範囲で測定している。

当研究施設のFELを使用して、非冷却の熱型2次元赤外イメージセンサの分光感度特性を測定した。これまでは光源に黒体炉とバンドパスフィルタを使用していたが波長10μm以上では黒体炉パワーは小さく測定は困難であった。FEL光をイメージセンサ

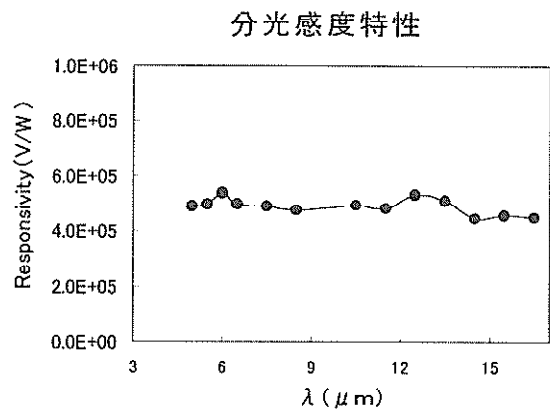


図3 赤外イメージセンサの分光感度特性

に直接入射し、出力画像の時間変化を計測する。フィールド間隔(16.6msec)ごとに表示される画像出力はFELのパルス光の照射後に急激に立ち上がり、センサの熱時定数によって次第に減衰してゆく。数フィールドの画像データと熱時定数から照射直後のイメージセンサの画像マップを計算し図3のように5-16.5 μm の赤外イメージセンサの分光感度特性を測定した。

半導体の浅い準位の電気的、光学的な各種測定にFEL光を用いることも熱的な手法に比べ波長を可変にすることによって特定レベルにチューニングすることができるため有効である。ErドープSi, YbドープInPなどで調べられている¹⁸⁾¹⁹⁾。SiO₂/Si界面の電荷分布の測定にFELを使用した報告例もある²⁰⁾。

3.1.3 半導体プロセスへの応用

FELを利用した多方面の応用がなされつつあるが半導体プロセス技術への応用例はこれまでのところそれ程多くはない。(株)自由電子レーザー研究所で行われたSiCのFELアニーリングはその1つである²¹⁾²²⁾。すなわちアモルファスSiCをRFスパッタによりSi基板に成膜しておきFELの波長可変性を利用してSi-Cの伸縮振動による共鳴吸収に対応した12.6 μm の中赤外を照射すると常温で再結晶化が起こった。又イオン注入したSiC中のドーパントの活性化が可能となった。

又同じく同研究所ではアモルファスSi(a-Si)薄膜に7.85 μm のFELを照射してアブレーションを起こさせ、生成物質の同定を行って²³⁾。

a-Siデバイスの信頼性に関わる重要な課題にa-Si:Hの不安定性がある。FEL光で直接Si:Hボンドを切断してa-Siの電気的、光学的特性を改良しようとする試みが報告されている²⁴⁾。Si:Hボンドの伸縮振動波長5 μm 前後にFEL光をチューニングして照射し結晶性の向上をラマン分光で評価している。結晶性が向上している。

さらにRFスパッタとFELを組み合わせITO膜のFELアシストスパッタを行いITO膜の透過率の改善を報告している²⁵⁾。この場合ITOの赤外吸収スペクトルSnO(12.1 μm)InO(14.2 μm)に対応した12.1 μm 、20MWのFEL光を照射している。

米国においてはThomas Jefferson研究所を中心としてmaterials processingの研究が盛んである。特にFELが大出力(平均1KW)であるため Pulsed Laser Deposition(PLD)などの励起光源としての用途には有利である。例えばCo, Fe, NbなどのFEL

を用いたPLDの研究がなされている²⁶⁾。

超LSIのフォトリソグラフィプロセスの光源にFELを適用する研究がなされている。リソグラフィの限界は光源の波長、レンズの性能、マスク構造、レジスト材料、デバイス構造などで決まるがその鍵は光源の波長である。短波長で安定なレーザー光源が要求されるが現在、最先端LSIの製造にはKrFエキシマレーザー($\lambda=248\text{nm}$)が多用されている。より短波長の光源としてArFエキシマレーザー($\lambda=193\text{nm}$)が導入されている。前述のように光源以外のいろいろな技術の組み合わせによってArFで0.1 μm レベルまで可能となっている。更にF₂エキシマレーザー($\lambda=157\text{nm}$)の出現によってこれまで何回となく次世代光源と言われてきたX線などの実用化時期は更にその先0.07 μm 以降と予測されている。半導体用フォトリソグラフィの次世代光源の一つとしてFELは次のような特長がある。

高出力であり、波長0.07 μm で10KWの研究報告がなされている。また波長可変のためフォトレジストやフォトマスクの材料の選択性が固定波長の他の光源より有利である。実験的には既に波長0.1 μm のSASE(Self Amplified Spontaneous Emission) FELが実現している²⁷⁾。

3.2 自由電子レーザーのバイオメディカル分野への応用

3.2.1 赤外FELによる遺伝子導入

細胞内に蛋白などの高分子を取り込ませ、その機能や特性を解析することに対するニーズが薬物評価、遺伝子治療に対して高まっており、既存技術に加えより効果的な取り込み方法が要望されている。そこで細胞膜等の赤外吸収に共鳴する波長のFELにより励起される衝撃反応を利用し、所望の物質が対象となる生体膜を低侵襲的に透過させる新しいメカニズムが提唱されている²⁸⁾。ここでは、赤外レーザーを用いたタバコ培養細胞(BY2cell)の遺伝子導入システムとフローセルを用いた赤外レーザー遺伝子導入の効率化について述べる²⁹⁾。対象としたタバコ培養細胞は、赤外吸収測定により図4に示す水に起因する波長6.1 μm の大きなピークと細胞膜などの脂質に起因すると思われる波長5.75 μm の小さな肩を持つ。そこで、吸収の大きい波長として6.1 μm 、5.75 μm を選択し、これを照射FEL波長として初期照射実験を行い、細胞死亡率および導入効率を観察した。結果、5.75 μm が6.1 μm と比較して優れていたため、

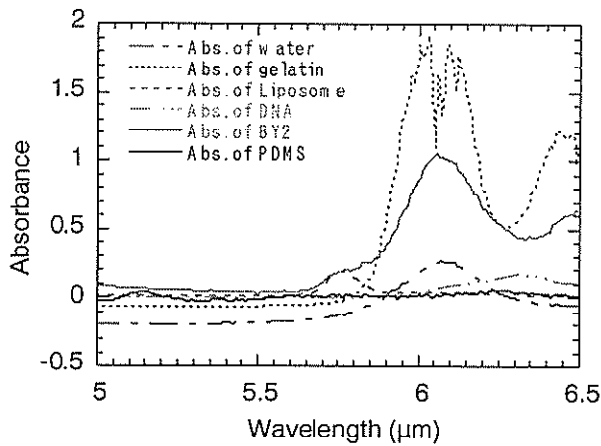


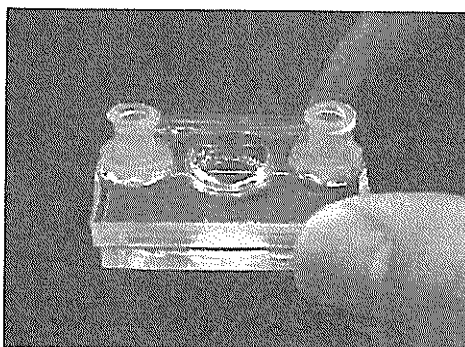
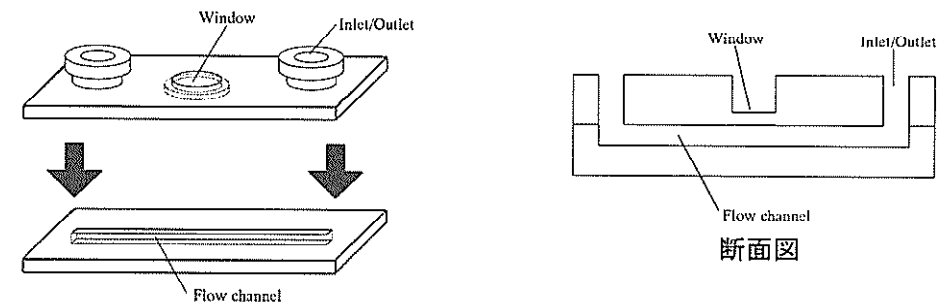
図4 BY2および関連する培地などの赤外吸収。
BY2細胞には波長6.1μmのピークとマイナーピークとして5.75μmのピークが観察。

波長5.75μmを使用した。この結果FEL処理によるGFPの一過的発現が観察され、FELを用いて細胞壁のある植物細胞への遺伝子導入が可能であることが示された。また連続的導入システムとして、図5に示す微小フローセルをPDMSを用いて作製し、これを用いて連続的に遺伝子導入を行った結果、導入効率約0.8%で遺伝子の導入が確認された。エネルギー効率で比較した場合、フロー系での遺伝子導入効率はバッチ系での効率と比較して大幅に改善されていることが判っており、これらの結果より、微小

フローセルを用いて細胞を高速・連続的に流し、目標細胞にFELを照射することにより、より効率よく遺伝子を導入することが可能となる。

3.2.2 光音響法を用いた分子振動領域における生体の動的光学定数の計測³⁰⁾

レーザーは幅広くバイオサイエンスに用いられてきているが、治療に用いられるときにはレーザー照射中の生体組織の状態変化に対する情報が取得困難であるため、我々はFEL照射により発生する衝撃音を計測し、対象となる生体組織の光学定数の測定を試みている。特に中赤外域は生体組織を構成する生体分子の分子振動領域に相当した吸収係数が極めて大きいため、光学定数の実時間でのモニタリングは、選択的治療や侵襲度の低い治療に有用である。対象には生体組織の擬似モデルとしてその主成分である水を用い、FELの照射波長は水の変角振動領域である5.6-6.8μmとした。レーザー衝撃音は0.1-10 MHzの音響トランスデューサーにより検出し、図6にも示す衝撃音の時間波形立ち上がりの最大値から光学減衰係数を求めた。FEL照射時における衝撃音時間波形から求めた吸収係数(μ_a)、減衰係数(μ_{eff})と常温・大気下における吸光度(μ_t)スペクトルの比較結果を図7に示す。この結果、求めた μ_a 、 μ_{eff} の波長依存性と μ_t のスペクトルとがほぼ位置することが判った。一部求めた μ_a 、 μ_{eff} が μ_t に比べてわず



流路深さ: 約400μm
流路幅: 500, 750, 1000μm
材質: PDMS (ポリジメチルシロキサン)
窓部: PDMS (厚さ約100μm)

PDMSの接着には酸素プラズマ処理を利用
PDMSは波長5.75μm近辺に吸収が無かったため窓部にも加工が容易なPDMSを使用した

図5 赤外レーザー処理用フローセルの作製

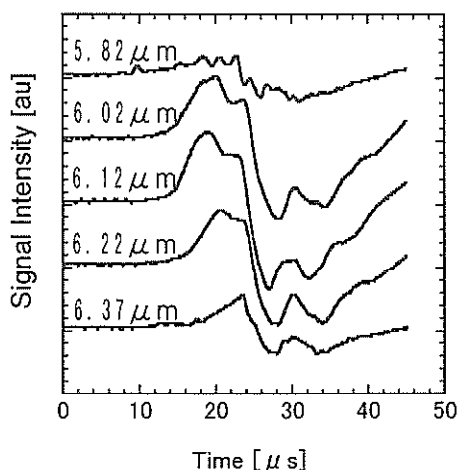


図6 各波長におけるレーザー衝撃音波形

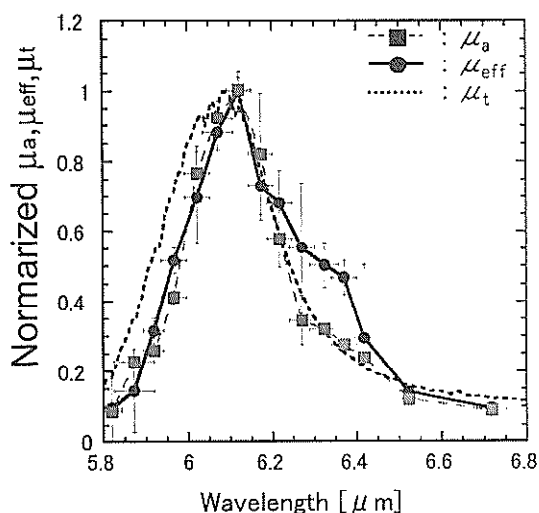


図7 吸収係数(μ_a)・減衰係数(μ_{eff})の波長依存性と吸光度(μ_t)スペクトルの比較

かながら長波長側にシフトすることも見いだされ、FEL照射の熱結果により照射部位近傍温度上昇が検出されていると考えられた。

4. 結びと今後の展望

4.1 半導体応用

3.1でFELの半導体への応用研究のいくつかを紹介した。特に中赤外、遠赤外領域で波長可変、高電界がFELで実現したことによってこれまで困難であった各種の半導体物性の実験的検証が可能になった。

Bloch oscillationの確認は、FELと併せて製作技術が進歩し10nmオーダーの超格子巾の結晶性のよい構造ができるようになり、Bloch周波数が100 μ m程度でFELで波長と高電界が実現できるようになった

ため可能になった。(例えばFEL光の電界が $F=10$ kV/cm, 超格子巾 $d=10$ nm, とするとBloch周波数 $f=dF/h=2.4$ THz, $\lambda=124\mu$ m)

Photon assisted tunnelingについても超格子のサブバンドエネルギー間隔がFELの波長程度になるような技術的進歩があったからである。(例えばGaAsのQW巾が10nmの時サブバンドの基底準位と第一励起準位のエネルギー差は54meV, $\lambda=23\mu$ mである)

Phonon bottleneckの直接観察においては照射光のエネルギーがLO phonon energyの前後に変化すると緩和時間が大幅に変わる(例えばGaAsのLO phonon energyは36meV, $\lambda=34\mu$ mである)。FELの遠赤外光で初めて観測が可能になった。

Impact ionizationもFELの高電界強度場(MV/cm)で初めて観測が可能になった現象である。

半導体の非線型光学特性の研究においても高強度のFEL光を必要とした。

赤外線検出器の性能評価は従来、黒体炉とフィルターを使用して10 μ m程度までの特定波長の測定しかできなかったがFEL波長可変光源によってさらに長波長のデータが得られ赤外線検出器の開発に有効に適用されている。

半導体プロセスへの応用においては波長可変と高出力特性が生かされている。以上見てきたFELの半導体への応用はその殆どは半導体物理の基礎物性を解明する研究である。実用化レベルの研究は今後の課題として残されているが半導体プロセスへの応用が製造技術として実用化の可能性が最も高いと考えられる。すなわちFEL光と格子振動の相互作用の利用は新しいプロセス技術として最も期待される。多くの材料の格子振動モードは中赤外から遠赤外領域にある。FELの高出力と波長走査性を利用してどの波長が励起に最も寄与するか探索し、その波長で格子振動を強く励起することにより材料に変化を与え、機能向上を図ることが期待できるからである。これまで試みられたレーザーアシストプロセスの多くは、使用レーザー波長は可変性でないため限られた波長でしか使用できなかったがFELの波長走査性を利用することによって、より最適化が可能となると考えられる。次にどのような可能性があるか具体的なデバイス、材料、プロセスによって個々に検討しなければならないが、一般的に次のような利点が考えられる。

FEL光はpsの高出力パルスである。このため熱的な影響を受けにくい。従ってプロセスによってはその低温化が可能になる。そして結果として例えば半導体接合の極浅接合などの形成が期待できる。又高出力パルスであると同時に平均的なパワーも大きい。従って適用条件によって大面積領域の一括照射、又高均一性が期待できる。高エネルギーパルスの特長を生かしてアブレーションも可能になる。材料によってはFELを照射し表面改良して、性能改善ができる。例えば密着強度を増大させることも期待できる。波長可変性を利用して、例えば従来の各種成膜法と組み合わせフォトアシストするか、又は一度成膜した後にFEL照射することにより膜質の向上が予想される。

半導体プロセスへの応用を考えた時、現在のFELシステムのような大規模のままでは半導体工場に受け入れられるのは困難と考えられる。基礎的な半導体物理の研究、計測評価などと併行して半導体プロセス応用研究もその基礎研究は現在のFELシステムを有効に活用するが実用化の段階においてはコンパクトで低価格なFELシステムや、例えばOPO(Optical Parametric Oscillator)などの他の光源の開発が望まれる。

4.2 バイオメディカル応用

3.2でいくつかの応用研究を紹介した。個々のテーマの発展が今後重要であることは言うまでもないので、本節では、新しいバイオ分野への応用として我々が進めている、「光を用いた機能分子制御技術の創生」につき紹介したい。

従来から知られているように、赤外線吸収は分子間あるいは原子間の振動に起因する。タンパク分子は、その末端にイオン化したあるいはイオン化していない-NH₂、-COOHがあり、中間に存在する多数のペプチド結合(-CO-NH-)とその側鎖の構造に依存して、個々のタンパク間において赤外線吸収は大きな特徴(差異)を持つことが明らかにされつつあり試薬の純度検定等の分析に応用が図られている。

このタンパク研究において自由電子レーザーの応用はまだ世界的に見て未踏の領域ではあるが、我々は自由電子レーザーを用いての生体分子のプロセッシングに対してすでに動脈硬化部位中のオレイン酸コレステリルの選択的除去、硬組織中のリン酸イオン基の選択的アブレーションについて興味ある知見を得ており、生体分子の選択的操作が可能であることを示した。

一方でヒトゲノムのドラフトシーケンス解読が完了した現在、個々のタンパクの機能解析が急務となっている。一部のタンパクの機能はすでに解明され、それぞれが生体内で「分子マシン」として活動しており分子マシンのシステムとして生命活動が営まれていると考えられている。しかし未知機能も多く、我々は機能を微細に制御する技術を手にしていないため、「分子マシン」の活用には至っていない。膨大な種類のタンパク機能を解析するには、一つ一つのタンパクについてそれぞれ個別に解離定数を逐次求める等、従来の生化学的手法では限界がある。チップテクノロジーなどを用いた網羅的な手法がいくつか提案されているが、タンパクの総量変化を知りえるのみで大まかな現象把握にしか使えない。スループット、コストのいずれの面においても、現状を打開するには観測系の並列化とミニチュアライズを同時に達成する必要がある、なおかつ将来の発展のためにはタンパク等の改質による生体分子機能を制御する手段とインテグレーション可能な手法が開発される必要がある。

我々は発振周波数可変大出力レーザー(自由電子レーザー)と赤外(IR)スペクトルのプロテオーム解析・操作技術への応用を提案しており、どちらの要素技術もそれぞれ近年生物学分野への応用が進んでいる。特に赤外スペクトル解析は従来有機化学分析に用いてこられた手法であるが、タンパクの高次構造解析と過度現象解析への応用可能性が注目され、きわめて急速に医学・生物学分野でも活用されるようになってきている。しかし、Q switched Nd:YAG laserで起きた温度ジャンプによる構造変化をIR spectroscopyで観測したというDL Lessonらの報告³¹⁾に見られるように、非特異的波長を用いた励起や、spectroscopyによる観察は多数見られるが、アミドのC=O結合の特性振動を構造変化に積極的に利用したとする報告はない。

DNAシーケンス等の医学生物学分野で必要不可欠な分析技術ではすでに成熟の兆しを見せているが、現時点でを精力的に赤外レーザー光と赤外スペクトル解析技術の生命科学分野への応用技術の開発研究を進めることにより新たな産業基盤を作ることが可能となると考えている。

References

- 1) 中井, 栗津, 坪内, 浅川, 部谷, 今崎: 生産と

- 技術, 52(2000)8.
- 2) K. Unterrainer, B. J. Keay, M. C. Wanke, S. J. Allen, D. Leonard, G. Medeiros-Rebeiro, U. Bhattacharya, and M. J. W. Rodwell : Phys. Rev. Lett. 76(1996)2973.
 - 3) S. Winnerl, E. Schomburg, S. Brandl, O. Kus and K. F. Renk : Appl. Phys. Lett. 77(2000)1259.
 - 4) B. J. Kaey, S. Zeuner, S. J. Allen Jr, K. D. Maranowski, A. C. Gossard, U. Bhattacharya and M. J. W. Rodwell : Phys. Rev. Lett. 75(1995)4102.
 - 5) D. K. Ferry and S. M. Goodnick : Ensemble Monte Carlo Simulations of Ultrafast Phenomena in Semiconductors, Ultrafast Phenomena in Semiconductors (Springer 2001) pp.332.
 - 6) B. N. Murdin, W. Heiss, C. J. G. M. Langerak, S. C. Lee, I. Galbraith, G. Strasser, E. Gornik, M. Helm and C. R. Pidgeon : Phys. Rev. B55(1997)5171.
 - 7) P. Murzen, C. R. Pidgeon, J.-P. R. Wells and I. V. Bradley : Appl. Phys. Lett. 80(2002)1456.
 - 8) J. Cerne, J. Kono, M. S. Sherwin, M. Sundaram, A. G. Gossard, and G. E. W. Bauer, Phys. Rev. Lett. 77(1996)1131.
 - 9) J. Kono, M. S. Su, T. Inoshita, T. Noda, M. S. Sherwin, S. J. Allen, Jr., and H. Sakaki : Phys. Rev. Lett. 79(1997)1758.
 - 10) A. G. Markelz, N. G. Asmar, B. Brar, and E. G. Gwinn : Appl. Phys. Lett. 69(1996)3975.
 - 11) T. Takahashi, O. Mizuno, H. Kubo, N. Mori, C. Hamaguchi, C. T. Foxoon, and L. Eaves : Proc. 25th Int. Conf. Semicond., Osaka2000 (2000)1525.
 - 12) N. Mori, H. Nakano, H. Kubo, C. Hamaguchi and L. Eaves : Physica B 272 (1999) 431.
 - 13) K. B. Nordstrom, K. Johnson, S. J. Allen, A.-P. Jauho, B. Birnir, J. Kono, T. Noda, H. Akiyama and H. Sakaki : Phys. Rev. Lett. 81(1998)457.
 - 14) K. Nishi, H. Ohyama, T. Suzuki, T. Mitsuyu and T. Tomimasu : Appl. Phys. Lett. 70(1997)2171.
 - 15) K. Nishi, H. Ohyama, T. Suzuki, T. Mitsuyu and T. Tomimasu : Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997)1795.
 - 16) K. Nishi, H. Ohyama, T. Suzuki, T. Mitsuyu and T. Tomimasu : Appl. Phys. Lett. 70 (1997)3585.
 - 17) S. Winnerl : Microelectronics. J. : 31(2000)389.
 - 18) T. Gregorkiewicz., D. T. X. Thao, J. M. Langer : Phys. Rev. 61(2000)5369.
 - 19) M. Forcales, M. Kilk, N. Q. Vinh and T. Gregorkiewicz : J. Luminescence 94-95(2001)243.
 - 20) M. Marsi. R. Belkhou, C. Grupp, G. Panaccione and Taleb-Ibrahimi : Phys. Rev. 61 (2000)R5070.
 - 21) H. Ohyama et al : J. Appl. Phys. Part 2, Vol. 35(1996)L683.
 - 22) H. Ohyama et al : Appl. Phys. Lett., Vol. 71(1997)823.
 - 23) Y. Maeda et al : Nucl. Inst. & Meth., Vol. B144(1998)152.
 - 24) D. Gracin, V. Borjanovic, B. Vlahobio : Nucl. Inst. & Meth., Vol. A475(2001)635.
 - 25) M. Yasumoto et al : Proc. Beams 1999 Kyoto, 43.
 - 26) A. Reilly et al : FEL2000(Duke Univ. USA) abstract pp.252.
 - 27) C. Pagani, E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller and M. V. Yurkov : Nucl. Inst. & Meth. : Vol. A475(2001)391.
 - 28) K. Awazu, S. Ogino, E. Nishimura, T. Tomimasu, M. Yasumoto, S. L. Jacques : Proc laser-tissue interaction VIII, SPIE 2975(1997)302.
 - 29) Kunio Awazu, Takeshi Kinpara, Eiichi Tamiya, Nuclear Instruments and Methods B (*in press*)
 - 30) 永田博之, 部谷 学, 栗津邦男, レーザー学会 学術講演会第22回年次大会, 講演論文集p212, (2002/1-24-25)
 - 31) DL Lasson et al, PNAS : vol. 97, 2527-2532, (2000)