

光照射走査型トンネル顕微鏡によるナノスケール熱計測

北村龍星^A、川村亮太^A、玉置亮^A、田原弘量^A、武田淳^A、片山郁文^A

横浜国立大学大学院 数物・電子情報系理工学専攻^A

Observation of Nanoscale Thermal Electrons using a Photo-irradiated Scanning Tunneling Microscope

R. Kitamura^A, R. Kawamura^A, R. Tamaki^A, H. Tahara^A, J. Takeda^A, and I. Katayama^A

Graduate School of Engineering Science, Yokohama National University^A

We have investigated electrons generated by laser irradiation on an Au(111) thin film on a mica substrate using scanning tunneling microscopy (STM) and scanning tunneling spectroscopy. When focusing laser light on the sample surface near the STM tip, heat generated by the laser irradiation changes the tunneling current and current-voltage characteristics. The increase in tunneling current depends on the laser light intensity, which indicates the heat transfer from the laser spot to the STM tip. Based on the Bardeen model of electron tunneling, we simulated changes in the I-V curves to clarify the origin of the current increase. As a result, we were able to qualitatively reproduce some characteristics of the I-V curve by adjusting the distance between the tip and the sample and the electronic temperature. The results demonstrate the importance of photo-irradiated STM for investigating nanoscale thermal transfer in materials.

1. はじめに

近年の電子デバイスの高性能化に伴い、半導体基板上における電子回路の微細化は必要不可欠な課題となっている。現時点でもすでに回路の微細化については物理的な限界点に至りつつあり、かつ演算に伴う発熱の問題も顕在化している。これらの打開策として、新規ナノスケール材料の導入が期待されているが、ナノスケールでの演算特性や熱特性を評価して制御する技術は確立されていない。

そこで本研究では、ナノスケールの計測が可能な測定手法として走査型トンネル顕微鏡 (STM) に着目した。STM は探針と試料の間に流れるトンネル電流を検出することにより、原子スケールの空間分解能で伝導体あるいは半導体表面を観測できる顕微鏡 [1] であり (図 1)、走査トンネル分光法 (STS) を用いて電子状態を評価可能である。

我々は、熱励起の影響を探るために、高い空間分解能をもつ STM とレーザー光によ

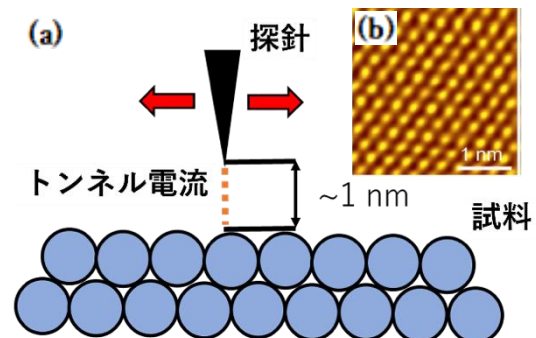


図 1. (a) STM の測定原理、(b) 高配向性熱分解グラファイト (HOPG) の STM 原子像 (-1.5 V, 0.1 nA) [4]

る励起を合わせた光照射 STM による計測を試みた。光照射 STM ではキャリアの励起によるトンネル電流の光増強効果の観測 [2] や探針-試料間近傍への光照射による熱起電力の計測 [3] がなされている。本研究では、金属基板上にレーザー光を照射することで発生する熱の影響を STS 測定により観測した。また、STS の測定条件におけるトンネル電流の計算モデルを構築し、試料基板の温度に応じた電流-電圧 (I - V) 曲線と実験結果を比較した。

2. 実験方法

本実験は、大気中に STM (ユニソク製) を設置し、常温下での測定を行った。試料には、マイカ基板上に蒸着した厚さ約 200 nm の Au(111) 薄膜を用いた。探針は、電解研磨により作製したタングステン (W) 探針を試料上で清浄化して使用した。

また、STS において、探針を試料上の任意の位置に固定し、印加するバイアス電圧を変化させたときのトンネル電流の I - V 特性を取得した。

そして、図 2 に示したように、設置した STM に対して側面からレーザー光 (波長 405 nm、出力~25 mW) を集光し、熱源とした。集光スポットサイズは 27 μm 程度であり、探針から 300 μm 離れた表面に照射している。照射中に STS 測定を実施し、レーザー光の強度ごとの測定結果を比較した。

トンネル電流量は探針および試料の状態密度 (DOS) に依存することから、STS 測定により得られた I - V 曲線について、その微分に当たる dI/dV 曲線を求めると、以下の式 (1) のように表面の局所状態密度 (DOS) を反映することが知られている。

$$\frac{dI}{dV} \propto \rho_{\text{sam}}(eV) \quad (1)$$

$\rho_{\text{sam}}(eV)$ はエネルギー準位 eV にある DOS であり、 dI/dV 曲線から試料の局所的な電子状態を調べることが可能である。

これを熱特性の測定に活用するために、標準試料である Au(111) 表面に対して光照射し、電流電圧特性の変化を STM および STS によって評価した。また、トンネル電流のモデル計算結果と比較することによって、電流の変化をもたらす原因について考察した。

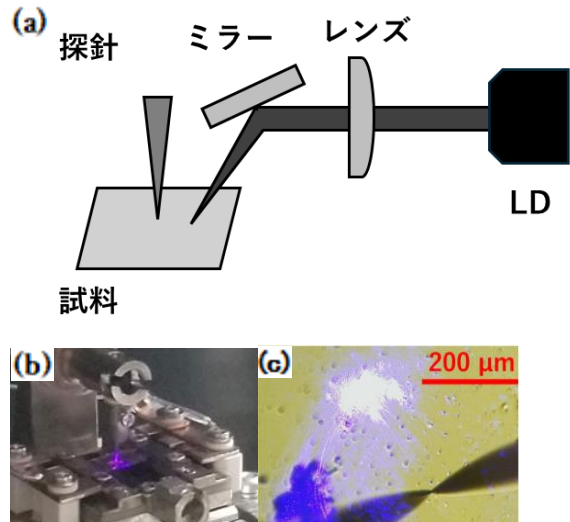


図 2. (a) 実験系略図 (b) 照射時の写真 (c) 照射時の光学顕微鏡像

3. 実験結果

図 3 は光照射を行った状態で I - V 測定を行った結果を示している。

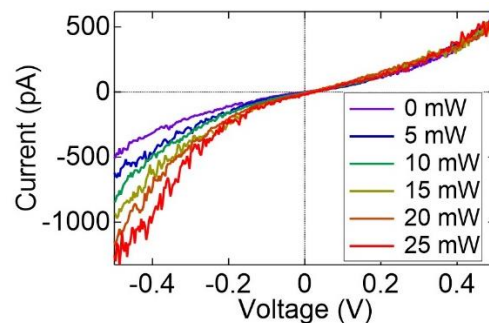


図 3. 連続光照射時の I - V 測定結果 (500 pA, 0.5 V)

レーザー光の強度の増加とともに負バイアス電圧側、探針から試料方向に流れるトンネル電流が増大した。これは電子の熱励起によるものと考えられる。光照射により試料に熱が生じ、試料側の電子にエネルギーが与えられることにより熱的に励起される

ためであると考えられる。その結果、励起された電子は相対的にポテンシャル障壁が減少することにより探針側へ流れやすくなり、トンネル電流が増大したと考えられる。

これらの実験結果を説明するために、Bardeen's model [5] を使用したシミュレーションを行った。このモデルでは、図 4 に示したように、探針-試料間に電圧 V_b を印加した際のポテンシャル障壁をモデル化している。

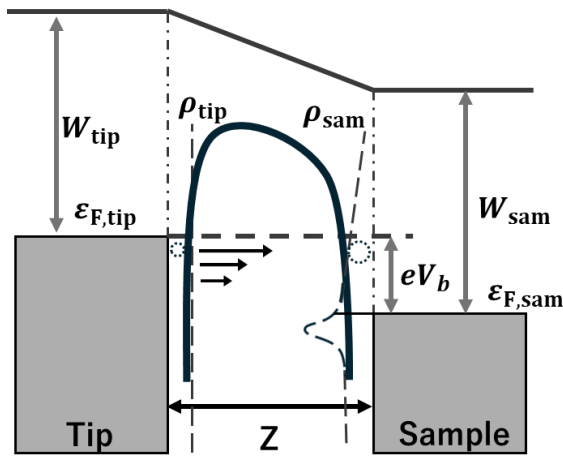


図 4. 金属-絶縁体-金属 (MIM) 接合におけるポテンシャル障壁モデル

ここで、 W_{tip} 、 W_{sam} は探針と試料の仕事関数、 ρ_{tip} は探針の状態密度 (DOS)、 $\epsilon_{F,tip}$ 、 $\epsilon_{F,sam}$ は探針と試料のフェルミ準位を示す。

このモデルより、電流密度 $J(Z)$ を求めると以下の式 (2) で表わされる。

$$J(Z) = \frac{4\pi e}{\hbar} \int_0^{eV_b} \rho_{tip}(\epsilon - eV_b) \rho_{sam}(\epsilon) \{ f(T_{tip}, eV_b, \epsilon) (-f(T_{sam}, 0, \epsilon)) - f(T_{sam}, 0, \epsilon) (-f(T_{tip}, eV_b, \epsilon)) \} T(\epsilon, Z) d\epsilon \quad (2)$$

ここで、 V_b は試料に加わる総電圧、 T は電子のエネルギー ϵ および探針-試料間の距離 Z に依存した透過率、 f はフェルミ・ディラック

分布である。フェルミ・ディラック分布の式は、以下の式 (3) で表わされる。

$$f(T, \mu, \epsilon) = \frac{1}{e^{\frac{1}{k_B T}(\epsilon - \mu)} + 1} \quad (3)$$

ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は温度 (探針、試料それぞれの温度を導入し計算)、 μ は化学ポテンシャル (eV_b に置き換えて計算) である。この式の導入により熱によるトンネル電流への影響を再現することを試みた。

図 5 にレーザー光の非照射時の $I-V$ 曲線とシミュレーションの結果を示す。

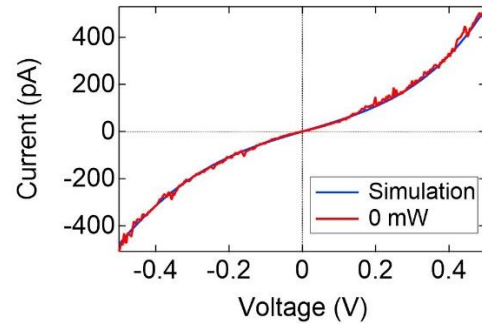


図 5. 非照射時の $I-V$ 曲線とシミュレーション結果

図のように、実験結果に近い $I-V$ 曲線が得られた。この曲線の傾きと曲率はそれぞれ、探針-試料間の距離と DOS に依存している。探針-試料間の距離の減少により、透過率が大きくなることで、トンネル電流が指数関数的に増大する。DOS については、電圧の正負で曲率の異なる二次関数を導入することで、 $I-V$ 曲線の曲率が変化する。探針-試料間の距離と DOS の調整により、実験結果の再現が可能である。

次に、連続光照射時のトンネル電流を計算するために、試料温度のみを 300 ~ 1500 K に変化させた。測定時には電圧 0.5 V で

電流が 0.5 nA となるように探針-試料間の距離を調整することから、シミュレーションでも同様に距離を調整した。図 6 にその結果を示す。

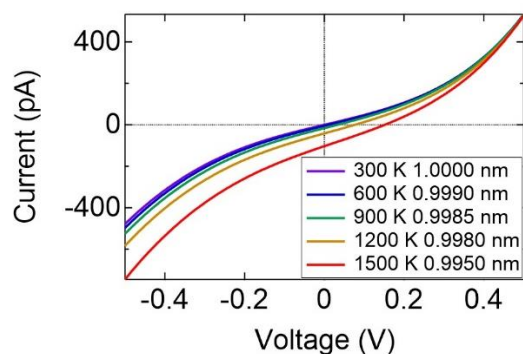


図 6. 温度依存性 シミュレーション結果 ($T_{\text{sam}} = 300 \sim 1500 \text{ K}$)

図のように、 I - V 曲線が試料の温度の上昇に伴い、負側へと遷移することがわかる。これは、図 3 で示されているレーザー光の強度依存性と同様の結果であり、実験で見られた負バイアス側でのトンネル電流の増大は、電子温度の上昇によって説明できるものと考えられる。

一方で金の融点は 1336 K 程度 [6] であることから、試料がこのような高温状態にあることは想定し難い。また、バイアス電圧が 0 V の部分を比較すると、シミュレーションでは負のトンネル電流が確認できるが、連続光照射の実験では電流は流れておらず実験結果とは一致していない。

探針の温度上昇による影響を調査するため、探針と試料の温度を同一に上昇させて比較した。温度の上昇に伴い、バイアスの正負によらずトンネル電流は増大したが、0 V における誘起電流は観測されなかった。

探針と試料の温度差が 0 V における誘起

電流の大きさに影響することから、実際の試料の温度上昇はシミュレーションで見積もられた値よりも小さいと考えられる。

このことから、試料の温度上昇による負バイアス側でのトンネル電流の増大への寄与は小さいと考えられる。

4. まとめ

本研究では、光照射 STM を用いた Au(111) 薄膜上における熱電子の観測と、 I - V 曲線に対する Bardeen's model によるシミュレーションを行った。実験では、レーザー光照射によって試料から探針へのトンネル電流の増大が観測された。また、レーザー光の強度に依存して電流値が増大した。シミュレーションでは、非照射時における I - V 曲線の再現が確認された。照射時の I - V 曲線については、温度依存性は確認されたものの、0 V における誘起電流や温度などに齟齬が見られた。これらのことから、トンネル電流の増大には、試料の温度上昇を含む複合的な要素が寄与していると考えられる。

参考文献

- [1] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, Phys. Rev. Lett. 49, 57 (1982).
- [2] L. Q. Qian and B. W. Wessels, Appl. Phys. Lett. 58, 1295 (1991).
- [3] J. M. R. Weaver, L. M. Walpita, and H. K. Wickramasinghe, Nature 342, 783 (1989).
- [4] H. Chen *et al.*, J. Vac. Sci. Tech. B, 32, 061801 (2014).
- [5] Y. Luo *et al.*, Phys. Rev. B 102, 205417. (2020).
- [6] H. Masatake, J. Vac. Soc. Jpn. 51, 11, 721-726 (2008)